



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS - UFAL
CENTRO DE EDUCAÇÃO - CEDU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE CIÊNCIAS E
MATEMÁTICA – PPGECIM**

EDSON SANTOS JÚNIOR

**A UNIFICAÇÃO NEWTONIANA APRESENTADA MEDIANTE OBJETOS
VIRTUAIS DE APRENDIZAGEM**

**Maceió
2016**

EDSON SANTOS JÚNIOR

**A UNIFICAÇÃO NEWTONIANA APRESENTADA MEDIANTE OBJETOS
VIRTUAIS DE APRENDIZAGEM**

Dissertação Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ensino de Ciências e Matemática.

Orientador:
Prof. Dr. Jenner Barretto Bastos Filho

**Maceió
2016**

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

S237u Santos Júnior, Edson.
A unificação newtoniana apresentada mediante objetos virtuais de aprendizagem / Edson Santos Júnior. – 2016.
149 f. : il.

Orientadora: Jenner Barreto Bastos Filho.
Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências e Matemática) –
Universidade Federal de Alagoas. Centro de Educação. Programa de
Pós-graduação em Ensino de Ciências e Matemática. Maceió, 2016.

Bibliografia: f. 75-80.
Apêndice: f. 81-149.

1. Física - Ensino. 2. Objeto de aprendizagem. 3. Unificação da física.
4. Ferramenta pedagógica. I. Título.

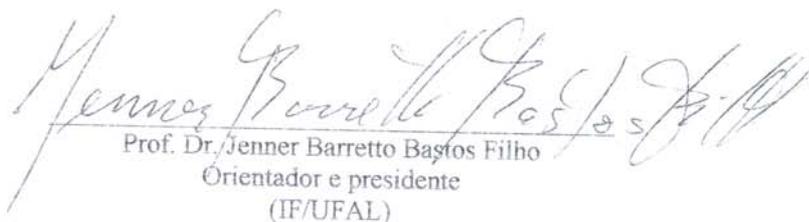
CDU: 372.853

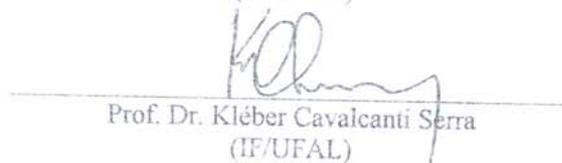
EDSON SANTOS JÚNIOR

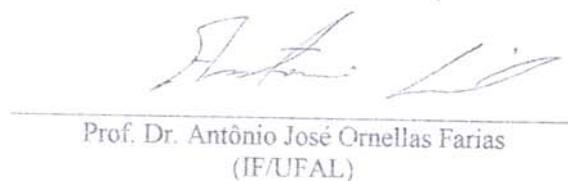
**“A UNIFICAÇÃO NEWTONIANA APRESENTADA MEDIANTE OBJETOS
VIRTUAIS DE APRENDIZAGEM”**

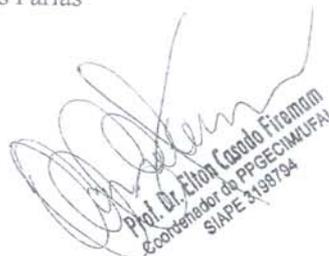
Dissertação apresentada à banca examinadora como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Ensino de Ciências e Matemática – Área de Concentração “Ensino de Física”, pelo Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática do Centro de Educação da Universidade Federal de Alagoas, aprovada em 30 de março de 2016.

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Jenner Barretto Bastos Filho
Orientador e presidente
(IF/UFAL)


Prof. Dr. Kléber Cavalcanti Serra
(IF/UFAL)


Prof. Dr. Antônio José Ornellas Farias
(IF/UFAL)


Prof. Dr. Elton Casado Firmian
Coordenador da PPGE/UFAL
SIAPE 3198794

À Mariana, que tem um longo caminho pela frente, na física e ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Carolina e Edson, pelo exemplo nos estudos.

Ao Prof. Dr. Jenner Barretto Bastos Filho, pelo apoio e motivação.

Não sei o que possa parecer aos olhos do mundo, mas aos meus pareço apenas ter sido como um menino brincando à beira-mar, divertindo-me com o fato de encontrar de vez em quando um seixo mais liso ou uma concha mais bonita que o normal, enquanto o grande oceano da verdade permanece completamente por descobrir à minha frente.

Isaac Newton

RESUMO

Nesta dissertação foi elaborada uma construção teórica, enquanto narrativa didático-pedagógica da unificação da Física de Galileu com a Astronomia de Kepler realizada por Isaac Newton na teoria da Gravitação Universal e para tanto nos orientamos por Bastos Filho (1995). Essa teoria é de extrema importância para a ciência uma vez que possibilitou entender o comportamento dos planetas em suas trajetórias em torno do sol tornando-se condição *sine qua non* para a exploração espacial. Foram incorporados e conectados na construção teórica quadros conceituais teóricos que subjazem a esse complexo processo de unificação bem como os fundamentos epistemológicos nele envolvidos como aqueles propiciados por Newton (1987), Galileu (1935), Peirce (1975), Kuhn (1990), Popper (1994), Contador (2012), Bryant (1920) entre outros. Foram construídos, como produto desta dissertação objetos virtuais de aprendizagem na forma de animações, simulações e modelagens computacionais que abordam a Física envolvida na Teoria da Unificação e para tanto nos orientamos por Quelhas (1999), Byrne (1999), Borges (1997), Moreira (1996), Wittgenstein (1922), Veit (2002), Johnson-Laird (2013) entre outros. No que concerne à formatação dos Objetos Virtuais de Aprendizagem nos orientamos por Santos (2000), Sahin (2006), Paiva (2012), Lévy (2011), Medeiros (2002), Prata (2007), Valdivia (2008), Fiolhais e Trindade (2003), Wiley (2000) entre outros. A Teoria dos Modelos Mentais de JOHNSON-LAIRD (1983) constituiu-se na fundamentação teórica propriamente dita das simulações computacionais. Essa ferramenta pedagógica poderá facilitar, ainda que parcialmente, a compreensão da Física envolvida na concepção da Teoria da Gravitação Universal, produzir metac conhecimento como também facilitar a compreensão adequada das questões epistemológicas suscitadas.

Palavras Chaves: objeto de aprendizagem; unificação da Física; ferramenta pedagógica.

ABSTRACT

In this dissertation, a goal of learning was developed as a theoretical construction, related to a didactic and pedagogical narrative relative to the unification of Galileo's Physics and Kepler's Astronomy held by Isaac Newton's theory of universal gravitation. For both, we were guided by Bastos Filho (1995). This theory is extremely important for Science, once enabled us to understand behavior of the planets in their paths around the Sun becoming condition sine qua non for space exploration. This object was developed in the form of animations, simulations and computer modelling that address the physics involved in this unification guided by the work developed by Quelhas (1999), Byrne (1999), Borges (1997), Moreira (1996), Wittgenstein (1922), Veit (2002), among others. Regarding the importance and formatting virtual objects of learning, we were guided by Santos (2000), Sahin (2006), Paiva (2012), Lévy (2011), Medeiros (2002), Prata (2007), Valdivia (2008), Fiolhais e Trindade (2003), Wiley (2000), among others. We also seek to show that the theory of mind modelling by Johnson-Laird (1983, 2005), it constituted a psychology that can trace methodological approaches to computer simulations. The extracted understanding in the development of this product is that this pedagogical tool can facilitate the work of the teacher, in classroom, in understanding of physics related to the gravitational unification's theory, and may produce metacognition and contribute to the proper understanding of raised epistemological questions.

Keywords: goal of learning, unification of Physics, pedagogical tool.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Modelos Mentais como uma possibilidade conciliadora entre os imagistas e os analógicos	37
Figura 2	Distinção de categorias de representação como imagem e como proposição, adaptado de Arruda (2003)	38
Figura 3	Esquema de Borges (1997) sobre as diferentes concepções de Modelo Menta	38
Figura 4	Procedimentos para a realização da pesquisa	67

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	08
1.1 OBJETIVOS.....	11
1.1.1 GERAL.....	11
1.1.2 ESPECÍFICOS.....	11
2 A UNIFICAÇÃO.....	13
2.1 ENTENDIMENTO HUMANO.....	14
2.2 O LEGISLADOR DOS CÉUS.....	16
2.3 DUAS NOVAS CIÊNCIAS.....	17
2.4 PRINCÍPIOS MATEMÁTICOS.....	17
2.5 RECONSTRUINDO A GRAVITAÇÃO UNIVERSAL.....	19
2.5.1 Relacionando G com K.....	19
2.5.2 Relacionando G com g.....	27
2.5.3 Relacionando G com k: Teste Final.....	28
2.6 ABDUÇÃO.....	29
3 MODELOS MENTAIS.....	32
3.1 MODELOS MENTAIS.....	33
3.1.1 Representações Proposicionais, Representações Analógicas e os Modelos Mentais.....	35
3.1.2 Modelo Proposicional e Representação Proposicional.....	39
3.1.3 Modelos Conceituais e Modelos Mentais.....	40
3.1.4 Modelos Mentais e seus Princípios.....	41
3.1.5 Raciocínio Dedutivo e os Modelos Mentais.....	42
3.1.6 Os Modelos Mentais e sua Estrutura.....	43
3.2 NOSSO MÉTODO.....	45
4 OBJETOS VIRTUAIS DE APRENDIZAGEM.....	46
4.1 UTILIZAÇÃO DAS TIC.....	48
4.2 COMPUTADORES COMO MÁQUINAS DE ENSINAR.....	50
4.3 OBJETOS VIRTUAIS DE APRENDIZAGEM.....	54
4.4 ANIMAÇÕES E SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS.....	57
5 METODOLOGIA.....	64
5.1 NATUREZA DESTA PESQUISA.....	64
5.2 OBJETO.....	64
5.3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	65
5.3.1 Leis de Newton, um laboratório virtual.....	66
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	68
7 REFERÊNCIAS.....	71
APÊNDICE A.....	77
APÊNDICE B.....	93
APÊNDICE C.....	120

1 INTRODUÇÃO

Ensinar é e sempre será um grande desafio, principalmente no tocante às ferramentas a serem utilizadas. Entrar em uma sala de aula tendo pleno domínio da disciplina a ser discutida, embora seja algo imprescindível, não é suficiente para o pleno exercício do mister do professor, pois ainda precisamos trabalhar o necessário diálogo cognitivo entre professor e aluno. Além disso, precisamos da atitude para fazê-lo de forma eficiente, viabilizando a aquisição de conhecimentos e a autonomia intelectual dos aprendizes.

Uma possível solução para a questão supracitada está nos Objetos Virtuais de Aprendizagem (OVA). Segundo Lévy,

[...] a escola é uma instituição que há cinco mil anos se baseia no falar/ditar do mestre [...] Uma verdadeira integração da informática (como do audiovisual) supõe, portanto, o abandono de um hábito antropológico mais que milenar. (2011, p. 8).

Essa integração tem ocorrido através da utilização, cada vez mais frequente, de objetos virtuais de aprendizagem, que são constituintes importantes das TIC (Tecnologias de Informação e Comunicação). No âmbito da disciplina Física, o quadro e a pura imaginação têm dado lugar a verdadeiros laboratórios virtuais.

Alguns professores mais entusiastas da Informática no ensino da Física têm alegado que, apesar de existirem dúvidas sobre as vantagens do uso de computadores para o desenvolvimento da personalidade, a sua utilidade no campo educacional do desenvolvimento do pensamento lógico da física seria inquestionável. (VRANKAR, 1996 apud MEDEIROS, 2002, p. 78).

Mesmo estando em fase embrionária a teoria específica sobre a utilização das TIC, tais como os OVA, essas tecnologias tem sido utilizadas indiscriminadamente por professores em todas as redes de ensino, em todos os níveis, pois se tornou sinônimo de sofisticação da instituição palco dessa utilização.

Uma escola que não recorra, ou melhor, que não integre os novos meios informáticos, corre o risco de se tornar obsoleta. Como diz Adell (1997), “as tecnologias de informação e comunicação não são mais uma ferramenta didática ao serviço dos professores e alunos... elas são e estão no mundo onde crescem os jovens que ensinamos”. (PAIVA, 2002, p. 7).

E como reforço a essa onda de modernização, existe a crença de boa parte dos profissionais de educação na otimização do ensino e da aprendizagem através da midiaticização. Sobre os professores, Paiva (2002, p. 20), afirma que “62% reconhecem que as TIC tornam as aulas mais motivadoras para os alunos, 52% que

as TIC encorajam os alunos a trabalhar em colaboração e 72% que ajudam os alunos a adquirir conhecimentos novos e efetivos”.

Muitos professores estão utilizando simulações computacionais e outras tecnologias de informação e comunicação numa tentativa de não se tornarem profissionais ultrapassados. Mas, ao fazê-lo, os docentes precisam conhecer as reais vantagens e desvantagens dessa utilização, uma vez que essas tecnologias não constituem uma panaceia, e sim uma alternativa.

Relativamente às TIC e à sua implementação nas escolas, deixamos uma nota final. Não basta achar que algo é bom: é preciso teorizar, passar à prática e, mais ainda, é necessário medir, avaliar. Só avaliando podemos selecionar as melhores ferramentas e metodologias e promover o progresso. (PERRATON, 2000 apud PAIVA, 2002, p.7).

Além das questões acima elencadas, este trabalho foi motivado pela utilização de animações e simulações computacionais, durante mais de uma década de atuação profissional do autor, no ensino médio. A prática revelou as vantagens do uso dessas ferramentas didáticas no ensino e aprendizagem da disciplina Física. Não obstante, não foi encontrada uma literatura específica que pudesse nortear seu uso de forma eficiente.

Por essas razões, tornam-se necessários estudos cada vez mais aprofundados sobre esse tema. Assim, a presente pesquisa investiga a utilização de simulações computacionais, animações e modelos digitais, pertencentes à classe dos Objetos Virtuais de Aprendizagem, no ensino e aprendizagem da disciplina física e para tanto utiliza, como palco desse estudo, o caso da unificação de Newton da física de Galileu com a astronomia de Kepler. Esse caso já foi tratado pelo filósofo Popper em sua obra *Conocimiento Objetivo*.

Popper mostrou que não se pode saltar através de raciocínio indutivo, da teoria de Galileu, que hoje sabemos ser válida, em ótima aproximação, para os movimentos, tendo lugar a pequenas distancias comparativamente ao raio da Terra, para a teoria da gravitação universal de Newton. De maneira análoga, Popper mostrou que a passagem da astronomia de Kepler para a Gravitação Universal não se deu através da indução [...]. (BASTOS FILHO, 1995, p. 233).

Em nossa investigação buscamos identificar um método de construção de simulações e modelagens que torne cognoscível o caso da Unificação de Newton da física de Galileu com a astronomia de Kepler, analisado por Popper (1972). Como disse Lévy (2011, p. 7), “[...] emerge neste final do século XX, um conhecimento por simulação que os epistemólogos ainda não inventariaram”. Contribuir com a escrita desse inventário é um dos objetivos deste estudo.

A primeira parte do trabalho (cap. 1) refere-se à tentativa de uma construção teórica sobre a unificação – realizada por Isaac Newton na teoria da Gravitação Universal – da Física de Galileu com a Astronomia de Kepler. Nessa tarefa, nos orientamos por Bastos Filho (1995) no desenvolvimento das argumentações sobre o assunto em questão. Além disso, incorporamos e conectamos os quadros conceituais envolvidos, tanto da física quanto da epistemologia, os quais, segundo a nossa própria interpretação, são concebidos a partir tanto de autores pré-newtonianos quanto pós-newtonianos, quanto também a partir do próprio Newton. Esses autores são: Newton (1987), Galileu (1935), Peirce (1975), Kuhn (1990), Popper (1994), Contador (2012), Bryant (1920), entre outros. Essa teoria é de extrema importância para a ciência uma vez que possibilitou entender o comportamento dos planetas em suas trajetórias em torno do sol, tornando-se condição *sine qua non* para a exploração espacial. O próprio Newton (1987, p. 170), escreveu no Escólio Geral dos *Principia* que "nessa filosofia as proposições particulares são inferidas dos fenômenos, e depois tornadas gerais pela indução". No entanto, Popper (1982) demonstrou a impossibilidade desse processo, contrariando os argumentos de Newton. Na proposta de Popper – inspirada em Peirce – as inferências tanto dedutivas quanto indutivas, por mais articuladas que sejam, necessitam de algo mais sutil e singular: a inferência abdutiva.

A teoria gravitacional de Newton é falsa não somente porque não resistiu ao fenômeno da precessão do periélio de Mercúrio. Ela também é falsa em muitos outros aspectos tais como, por exemplo, por admitir a interação instantânea à distância, não considerar o problema de multi-corpos envolvendo a contribuição não apenas da interação Planeta-Sol mas também de (Planeta-Planeta), por considerar massas enormes e extensas interagindo como pontos materiais; todas essas, decerto, são aproximações excelentes da realidade. (BASTOS FILHO, 1995, p. 241).

No capítulo 2 teceremos considerações sobre o conceito de Unificação e no capítulo 3 vamos nos dedicar a uma discussão ampliada sobre a Teoria dos Modelos Mentais.

A última parte (cap. 4) do trabalho refere-se ao, desenvolvimento de um produto educacional, que consiste em um conjunto de objetos virtuais de aprendizagem, tais como animações e simulações computacionais, que favoreçam a compreensão da unificação, feita por Newton, da física de Galileu com a astronomia de Kepler. Na elaboração desse produto, nos baseamos nos trabalhos de Medeiros (2002), Moreira (1996) e Wiley (2000) e na Teoria dos Modelos Mentais de Johnson-Laird (1983), que se constituíram na fundamentação teórica específica das simulações computacionais. É importante ressaltar que a convergência da nossa

análise epistemológica (cap. 1) e da Teoria dos Modelos Mentais (cap. 3) se encontram em Charles Sanders Peirce (1974) e seus Escritos Coligidos, *Conferências Sobre o Pragmatismo*. A Teoria dos Modelos Mentais, entre outros aspectos, se sustenta na metáfora da mente como um computador.

Possíveis metodologias para investigar modelos mentais estão baseadas na premissa de que as representações mentais das pessoas podem ser inferidas (modeladas) a partir de seus comportamentos e verbalizações. Além disso, supõe-se também que esses modelos podem ser simulados em computador. (MOREIRA, 1996, p. 210).

Essas ferramentas pedagógicas poderão propiciar, ainda que parcialmente, a facilitação da compreensão e da produção de *metaconhecimento* sobre a Física envolvida na concepção da Teoria da Gravitação Universal, como também facilitar a compreensão das questões epistemológicas suscitadas. Nossas simulações gráficas são modelos de ensino com a finalidade de facilitar o desenvolvimento de modelos mentais que possam se tornar compatíveis com o modelo científico pertinente ao caso da unificação.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver objetos de aprendizagem voltados para o caso da Unificação de Newton da Física de Galileu com a Astronomia de Kepler.

1.1.2 Específicos:

- a. Elaborar uma construção teórica da Unificação de Newton da Física de Galileu com a Astronomia de Kepler à luz da análise popperiana, a fim de identificar o método – através de Pierce – de produção do conhecimento obtido por Newton.
- b. Aplicar a teoria dos modelos mentais, no enfoque de Johnson-Laird (2005), e a abordagem de Wiley (2000) como suporte da psicologia educacional no desenvolvimento metodológico de objetos virtuais de aprendizagem da

simulação computacional voltada para compreensão do caso da unificação newtoniana da Física de Galileu com a Astronomia de Kepler.

- c. Desenvolver um objeto virtual de aprendizagem que possa facilitar a compreensão da unificação newtoniana da física de Galileu com a astronomia de Kepler.
- d. Fundamentar as vantagens do uso de objetos de aprendizagem elaborados a partir de uma sequência didática visando a compreensão de uma determinada teoria da Física.

2 O PROBLEMA DA UNIFICAÇÃO

Haveremos de convir, de antemão, que a história da ciência, tomada em seu sentido lato, embora não se confunda propriamente com a história das revoluções científicas, sem dúvida, a segunda constitui-se em parte constituinte de grande importância da primeira. Dessa forma, com Copérnico, questionou-se contundentemente o geocentrismo, construíram-se alicerces com a física de Galileu e a astronomia de Kepler e promoveu-se uma grande revolução científica, que culminou no paradigma newtoniano, carregando em seu bojo a Gravitação Universal: uma unificação que requereu a invenção de conceitos novos e revolucionários como os de massa, espaço absoluto, tempo absoluto e força, dando a esses um poder que depois de algum tempo veio a se tornar quase que natural na concepção dos indivíduos que se educaram no contexto desse novo paradigma. Mas não podemos falar sobre tão grande obra do conhecimento, tal como a unificação da física de Galileu com a astronomia de Kepler realizada por Newton, sem falar em sua concepção, sem nos perguntar e lançar conjecturas de como tal grandioso feito foi alcançado, não tanto por razões estritamente psicológicas e sim para procurarmos algumas luzes que nos possam orientar para que venhamos a emitir algum parecer sobre a natureza da ciência que, neste caso específico e à luz da concepção kuhniana acerca das características das revoluções científicas, diz respeito ao período de transição revolucionária e não de ciência normal. Cogitemos acerca da importante questão segundo a qual se este extraordinário episódio da história da ciência pode ou não ser razoavelmente concebido quer seja à luz de inferências indutivas quer seja a partir de inferências dedutivas, ou até mesmo a partir de uma combinação desses dois tipos de inferências.

Vejamos que o próprio Newton (1987, p. 170) escreveu no Escólio Geral dos *Principia* que "Nessa filosofia as proposições particulares são inferidas dos fenômenos, e depois tornadas gerais pela indução"

Pode causar uma certa estranheza aos olhos de intérpretes de finais do século XX e começo do século XXI que tão grandioso episódio que caracteriza a unificação por Newton da física de Galileu dos movimentos locais com a astronomia de Kepler tenha sido atribuído, pelo próprio Newton, como resultante de inferências indutivas. Popper (1982) envidou esforços para mostrar essa impossibilidade contrariando tanto o próprio Newton quanto um grande físico do século XX como

Max Born que em relação ao supracitado episódio também reiterou argumentos em prol das inferências indutivas. Ora, para um episódio tão importante, as inferências tanto dedutivas quanto indutivas, por mais articuladas que sejam, ainda carecem de algo mais sutil e singular. A proposta de Popper inspirada em Peirce é o da inferência abdutiva.

Para esse arrebatador episódio tomamos de Peirce o termo abdução e, à luz de Peirce e de Popper, tentaremos compreender a teoria da Gravitação Universal. Esta tentativa de compreensão e de resignificação tem também objetivo didático e, ao mesmo tempo, tem o objetivo de ensinar uma discussão sobre a natureza da ciência, tomando este exemplo de um episódio revolucionário e extraordinário como referência.

2.1 SOBRE O ENTENDIMENTO HUMANO

David Hume, apreciador das ideias de Isaac Newton¹, em sua *Investigação Sobre o Entendimento Humano* (1973), ao se perguntar qual é a natureza de todos os nossos raciocínios sobre questões de fato, baseou sua busca por uma resposta na relação de causa e efeito e concluiu, a respeito dessa relação, que todos os nossos raciocínios e conclusões estão fundamentados na experiência, o que o levou a uma última pergunta: “Qual é o fundamento de todas as conclusões tiradas da experiência?”. Ele a responde dizendo que os fundamentos de nossas conclusões não estão no raciocínio. “Digo, pois, que, mesmo depois de termos experiência das operações de causa e efeito, as conclusões que tiramos dessa experiência não são fundadas no raciocínio ou em qualquer processo do entendimento” (HUME, 1973, p. 141).

Segundo Charles Sanders Peirce (1974), em seus *Escritos Coligidos, Conferências Sobre o Pragmatismo*, o raciocínio humano pode ser classificado em três espécies: indução, dedução e abdução. Para Peirce a indução é um processo de investigação experimental no qual se verifica o grau de concordância da teoria

¹Hume sugere que a "ciência do homem" pode se equiparar a recentes conquistas na filosofia natural (com referências claras ao sucesso da astronomia planetária de Newton). [...]não existem dúvidas de que Hume pretendia que seus leitores acreditassem que Newton tinha dado forma a uma nova espécie de modelo. (SCHLIESSER, E., Hume's Newtonianism and Anti-Newtonianism, Disponível em: <<http://plato.stanford.edu/entries/hume-newton/#HumEvaNew>>. Acesso em 07 de Julho de 2014, tradução nossa)

com os fenômenos observados e a probabilidade² do mesmo ocorrer no curso da observação seguinte, o que foi predito por Hume, quando este afirma que “De causas que parecem semelhantes, esperamos efeitos semelhantes” (HUME, 1973, p. 142) nos permitindo, assim, generalizar: “A indução é o procedimento que leva do particular ao universal” (ARISTÓTELES *apud* ABBAGNANO, 2007, p. 556).

Outra forma de raciocínio é a dedução/silogismo como a derivação de uma proposição em outra e como um processo diferente da indução em sua estrutura esquemática, pois indução, reduzidamente, é a passagem do particular ao universal e a dedução, a passagem do universal ao particular. Abbagnano, por exemplo, assim expressa o raciocínio silogístico:

O silogismo é um raciocínio em que, postas algumas coisas, seguem-se necessariamente algumas outras, pelo simples fato de aquelas existirem. Quando digo 'pelo simples fato de aquelas existirem', pretendo dizer que delas deriva alguma coisa, e, por outro lado, quando digo 'delas deriva alguma coisa', pretendo dizer que não é preciso acrescentar nada de exterior para que a dedução se siga necessariamente. (Ibid., p. 233).

De acordo com Peirce (1974, p. 47), a dedução é o raciocínio da matemática e “Parte de uma hipótese, cuja verdade ou falsidade nada tem a ver com o raciocínio, e cujas conclusões são igualmente ideais”.

Em linhas breves descrevemos a indução e a dedução e, acerca delas, nos deparamos com a incapacidade das mesmas de engendrar a concepção de ideias novas que é a única forma de avançar que a ciência possui. Peirce (1974, p. 52) argumenta em prol da abdução que “é o processo para formar hipóteses explicativas. É a única operação lógica a introduzir ideias novas; pois que a indução não faz mais que determinar um valor, e a dedução envolve apenas as consequências necessárias de uma pura hipótese”.

Para Peirce a abdução é um juízo perceptivo, um instinto que nos guia e nos faculta o poder de adivinhar os desígnios da natureza através de *insights* da correta interpretação dos fenômenos da natureza. Ele afirma que:

Se o homem adquiriu a faculdade de adivinhar os desígnios da Natureza, não foi certamente através de uma lógica crítica e autocontrolada. Mesmo agora não é capaz de fornecer uma razão exata para as melhores conjecturas. Parece-me que a afirmação mais clara acerca da situação lógica [do problema] (...) é que o homem possui uma Compreensão (Insight) da Terceiridade³, dos elementos gerais, da Natureza, cujos acertos, se não

² PEIRCE, 1974, p. 52.

³ Peirce defende que o estudo fenomenológico tem como condição para sua realização o exercício de três faculdades que ele classificou como categorias universais e as denominou Presentidade ou Primeiridade, Conflito ou Segundidade e Terceiridade. A Primeiridade é a qualidade de sentimento, a

ganham *a priori* do erro, também não se podem dizer que sejam esmagados por ele. Chamei-lhe *Insights*, pois pertence à mesma classe de operações na qual estão incluídos os Juízos Perceptivos. Tem a natureza do Instinto, sendo semelhante aos instintos dos animais no ultrapassar o poder da razão e no sentido de guiar-nos como se estivéssemos de posse de fatos inteiramente fora do alcance dos instintos. Assemelha-se ao instinto também pela reduzida tendência ao erro; embora erremos frequentemente, a frequência relativa com que acertamos é a coisa mais maravilhosa de nossa constituição animal. (PEIRCE, 1974, p. 53).

Nos debruçamos em exaustivas análises dos resultados das experiências, deduzimos a partir desses resultados e induzimos novos, de novos experimentos, para que em dado momento a abdução nos abra os olhos ao que então parecerá óbvio mas que estava encoberto sob o véu de nossa, já vencida, ignorância.

2.2 O LEGISLADOR DOS CÉUS

No ano de 1609 em uma publicação intitulada “Sobre o Movimento de Marte”, o astrônomo alemão Johannes Kepler (1571 - 1630) – herdeiro de uma grande gama de dados obtidos a partir de observações do céu realizadas por seu mestre Tycho Brahe – após exaustivas análises, anunciou que os planetas se movem em órbitas elípticas em torno do Sol e que este ocupa um dos focos da elipse.

A verdade da natureza, que eu desprezara, voltou às escondidas pela porta traseira, disfarçando-se para ser aceita. Desprezei a primeira equação e voltei às elipses acreditando ser essa uma hipótese inteiramente diversa, ao passo que as duas, como provarei no capítulo seguinte, são a mesma... Pensei e calculei até a beira da loucura o motivo que o planeta preferia uma órbita elíptica... Ah que tolo que eu fui... (KEPLER *apud* CONTADOR, 2013, p. 175).

Thomas Kuhn o caracterizou como um neo platônico fiel que norteou seu trabalho na crença de que “leis matemáticas simples são a base de todos os fenômenos naturais e que o Sol é a causa física de todos os movimentos celestes” (KUHN, 1990, p. 246). Kepler buscou, também, outras formas de harmonia no movimento planetário, chegando a sua segunda lei na qual estabeleceu que “a velocidade orbital de cada planeta varia de tal modo que uma linha que una o planeta ao Sol cobre áreas iguais da elipse em intervalos de tempo iguais” (KUHN, 1990, p. 246). Mas sua grande sinfonia teve como ápice um novo tipo de lei astronômica, cujo acorde final é uma lei geral que estabelece a relação entre as

primeira percepção. A Segundidade é o fato, o material. A Terceiridade é a interpretação do fenômeno, a passagem do objeto para signo, a ponte entre a Primeiridade e a Segundidade através da qual interpretamos o mundo.

velocidades dos planetas em órbitas diferentes. A Terceira Lei, enunciada em 1619, em “As Harmonias do Mundo” diz que “A proporção existente entre intervalos de tempo de quaisquer dois planetas é exatamente a proporção sesquiáltera⁴ da distância média das órbitas” (KEPLER *apud* BRYANT, 1920 p. 50, tradução nossa).

Das palavras de Kepler, podemos inferir que o quociente entre o quadrado do período de revolução em torno do Sol e o cubo de sua distância média ao mesmo Sol é constante, sendo essa constante válida para todos os planetas do sistema solar.

2.3 DUAS NOVAS CIÊNCIAS

No sexto mês do ano de 1639 de Nosso Senhor, em seu confinamento, praticamente cego, Galileu Galilei segurou em suas mãos um exemplar de sua obra “Discorsi e Dimostrazioni Matematiche intorno a Due Nuove Scienze⁵” na qual tratava do movimento da queda dos corpos, definindo esse movimento como sendo uniformemente acelerado.

Quando, portanto, observo uma pedra que cai de uma certa altura a partir do repouso e que adquire pouco a pouco novos acréscimos de velocidade, por que não posso acreditar que tais acréscimos de velocidade não ocorrem segundo a proporção mais simples e mais óbvia? Se considerarmos atentamente o problema, não encontraremos nenhum acréscimo mais simples que aquele que sempre se repete da mesma maneira. O que entenderemos facilmente, se considerarmos a estrita afinidade existente entre o tempo e o movimento: do mesmo modo, com efeito, que a uniformidade do movimento se define e se concebe com base na igualdade dos tempos e dos espaços (com efeito, chamamos movimento uniforme ao movimento que em tempos iguais percorre espaços iguais), assim também, mediante uma divisão do tempo em partes iguais, podemos perceber que os aumentos de velocidade acontecem com simplicidade; concebemos no espírito que um movimento é uniforme e, do mesmo modo, *continuamente* acelerado, quando, em tempos iguais quaisquer, adquire aumentos iguais de velocidade. (GALILEI, 1985, p. 127, grifo nosso).

Observa-se, nas palavras de Galileu, a necessidade de adoção de uma gravidade constante, sendo então, *conditione sine qua non* para descrever o movimento de queda de uma pedra.

⁴ Com o termo *sesquiáltera* Kepler refere-se a proporção três meios, 3/2.

⁵ Discursos e demonstrações matemáticas relativas às Duas Novas Ciências

2.4 PRINCÍPIOS MATEMÁTICOS

Em 1687, sob o título de “Princípios Matemáticos da Filosofia Natural”, Sir Isaac Newton publicou descobertas, feitas cerca de vinte anos antes, durante seu refúgio da grande peste que assolou a Grã Bretanha em 1666. Nessa obra, Newton sintetiza a astronomia de Kepler e a física de Galileu, concebendo as três leis fundamentais da mecânica e a Lei da Gravitação Universal.

Até aqui explicamos os fenômenos dos céus e de nosso mar pelo poder da gravidade, mas ainda não designamos a causa desse poder. É certo que ele deve provir de uma causa que penetra nos centros exatos do sol e planetas, sem sofrer a menor diminuição de sua força; que opera não de acordo com a quantidade das superfícies das partículas sobre as quais ela age (como as causas mecânicas costumam fazer), mas de acordo com a quantidade de matéria sólida que elas contêm, e propaga sua virtude em todos os lados a imensas distâncias, decrescendo sempre no inverso do quadrado das distâncias. A gravitação com relação ao sol é composta a partir das gravitações com relação às várias partículas das quais o corpo do sol é composto; e ao afastar-se do sol diminui com exatidão na proporção do quadrado inverso das distâncias até a órbita de Saturno, como evidentemente aparece do repouso do apogeu dos planetas; mas ainda, e mesmo para os mais remotos apogeus dos cometas, se estes apogeus estão também em repouso. (NEWTON, 1987, p. 170).

Das palavras de Newton concluímos que “a matéria atrai a matéria na razão direta das massas e na inversa do quadrado das distâncias” (LACEY, 1983, p. IX)⁶, o que nos leva a uma constante universal e uma aceleração da gravidade variável.

Segundo Thomas S. Kuhn em “A Revolução Copernicana” (1990), em meados do século XVII Descartes, Borelli, Hooke, Huyghens e Newton reconheciam que para um planeta descrever uma órbita fechada em volta do Sol, era *condition sine qua non* o planeta “cair” continuamente para o Sol, convertendo assim, seu movimento inercial linear em curvilíneo. Em 1666, Newton se debruçou sobre o problema da atração gravitacional, chegando à solução matemática do cálculo da velocidade com a qual um planeta deve cair em direção ao Sol de forma a ter estabilidade em sua órbita e, em sua solução, a velocidade de queda depende do raio da órbita circular do planeta. Newton, ao perceber que “se as velocidades dos planetas e os seus raios orbitais estivessem relacionados entre si pela terceira lei de Kepler, então a atração que leva os planetas para o Sol deveria diminuir inversamente ao quadrado da distância que os separa do Sol”. (KUHN, 1956, p. 289).

⁶ LACEY, H. M., Newton, Vida e Obra, Coleção Os Pensadores, 1983, p. IX.

Newton percebeu também, que a mesma lei deveria explicar a diferença entre a queda da Lua em relação à Terra e de uma pedra próxima a superfície do planeta.

2.5 RECONSTRUINDO A GRAVITAÇÃO UNIVERSAL

À luz da crítica ao indutivismo, Karl R. Popper (1980, p. 24), relata: “A teoria de Newton, indubitavelmente deve muito às teorias de Galileu e Kepler; tanto, que o próprio Newton as considerou como sendo premissas indutivas (parciais)”. Nessa obra, Popper discorre muito sucintamente, sobre a inconsistência em se considerar Teoria da Gravitação Universal de Newton como sendo o resultado das inferências indutivas a partir das premissas de ambas, tanto da física de Galileu quanto da astronomia de Kepler.

Façamos então uma reconstrução racional do caso da unificação de Newton da Astronomia de Kepler com a Física de Galileu e que resulta na Gravitação Universal, a fim de entender suas semelhanças, diferenças e uma possível forma de compreensão de seu significado. Em nossa reconstrução racional, tal como argumentou Bastos Filho (1995), admitiremos como método de concepção da teoria da Gravitação Universal, o método das conjecturas – nesse caso, a conjectura de universalidade – para fenômenos disparees como a queda livre de uma maçã, uma pedra que gira presa a um barbante, a Terra orbitando o Sol, as marés, um corpo que desce um plano inclinado sem atrito e o lançamento de projéteis.

Neste exato momento, faz-se necessário enfatizar que a abordagem por nós proposta não é propriamente nem a de história da ciência nem a de pseudo-história e sim a de uma proposta que tem como objetivo precípuo nos engajar em uma narrativa que enseje uma compreensão didática e significativa da unificação newtoniana para estudantes dos tempos hodiernos. É também importante que nos atenhamos ao fato de que aqui estamos nos beneficiando de trabalhos de historiadores da ciência e de epistemólogos resguardando o nosso foco centrado muito mais no ensino de ciências, notadamente aqui, nos ensinamentos, de alguma maneira combinados, da física, da matemática e da astronomia.

2.5.1 Relacionando G com k de Kepler

Durante o século XVII, segundo Thomas S. Kuhn (1990, p. 285), uma pergunta pairava no ar respirado por alguns dos maiores pensadores da época: “por que razão os corpos pesados caem para a superfície de uma Terra móvel, seja qual for a posição da Terra no espaço?” E como resposta de Descartes tivemos: “Corpos soltos são conduzidos para a Terra pelo impacto dos corpúsculos aéreos no remoinho centrado na Terra” (DESCARTES *apud* KUHN, 1990, p. 285). Para os copernicanos: “os corpos pesados são levados para a Terra por um princípio atrativo intrínseco que atua entre as partes da matéria” (KUHN, 1990, p. 285). Para o próprio Copérnico em “De Revolutionibus”, “Agora parece-me a gravidade [que aqui significa simplesmente peso] não é mais do que uma inclinação natural, conferida às partes dos corpos pelo Criador, para combinar as partes na forma de uma esfera” (COPERNICO *apud* KUHN, 1990, p. 286). E para Kepler, a solução para essa pergunta consistia em “um princípio atrativo atuando entre a Terra e suas partes”. (KUHN, 1990, p. 286).

Após meados do século XVII, Descartes, Borelli, Hooke, Huygens e também Newton, admitiram que a órbita elíptica da Terra em torno do Sol, só era concebível, se esta estivesse em contínua queda em direção ao Sol transformando assim um movimento retilíneo inercial em um movimento curvilíneo e, portanto, acelerado, mas esta queda precisava ser entendida, por essa razão, vieram as tentativas de explicação.

Segundo Kuhn (1990, p. 285), para Descartes, os planetas “eram empurrados em direção ao Sol pelo impacto corpuscular”. Para Borelli (KUHN, 1990, p. 286), os planetas “possuíam uma tendência natural para se moverem em direção ao Sol”. Para Hooke, “eram levados para o Sol por uma atração mutua intrínseca” (KUHN, 1990, p. 286). Observemos que todas as explicações elencadas acima, estão em consonância com as ideias de seus respectivos autores sobre a queda dos corpos em direção a Terra.

Ainda segundo o autor de “A Revolução Copernicana”, Robert Hooke e Isaac Newton, possivelmente levados pelas ideias de René Descartes de um mecanismo em comum para a queda da Terra em direção ao Sol e de um corpo sobre a Terra, propuseram que a atração gravitacional entre uma pedra e a Terra, quanto à natureza e concepção, é a mesma atração gravitacional entre a Terra e o Sol.

Newton, por volta de 1666, chegou à determinação matemática da velocidade de um planeta em torno do Sol e a conclusão de que a velocidade de translação de um planeta e o raio de sua órbita estão relacionados pela Terceira Lei de Kepler e, portanto, para Newton, a força de atração sobre o planeta devido a sua interação com o Sol varia com o inverso do quadrado da distância entre seus centros de massa. As conclusões de Newton não pararam por aí, chegando a outra também de grande amplitude, que consistiu em aplicar a primeira conclusão à queda de uma maçã, por exemplo, na superfície da Terra.

O caminho trilhado por Newton, ao construir a Lei da Gravitação Universal, pode parecer ingenuamente natural a um intelecto desavisado, mas não pode ter sido de outra forma, senão, o caminho da adoção da conjectura ousada de um G universal, como disse Bastos Filho (1995).

Lembremo-nos das três Leis de Kepler:

1ª Lei – Lei das Órbitas.

“Todo planeta move-se em órbita elíptica com o Sol ocupando um de seus focos”. (CONTADOR, 2013, p. 170).

2ª Lei – Lei das áreas.

“Um planeta varre áreas iguais, em tempos iguais” (Ibid., p. 180).

3ª Lei – Lei dos períodos.

Os quadrados dos períodos dos planetas (ou seja, os respectivos quadrados dos tempos que os planetas levam para efetuar uma órbita completa em torno do Sol) são respectivamente proporcionais aos respectivos cubos de seus semieixos maiores. (Ibid., p. 191).

De acordo com Huygens, a aceleração que é impressa em uma pedra, através de um barbante preso a ela, enquanto a mesma gira acionada por um garoto, é dada por:

$$a_{cp} = \frac{v^2}{r} \quad (1),$$

onde v é a velocidade linear, para o caso em estudo, de módulo constante e r é o raio da circunferência de comprimento c descrita pela pedra em sua trajetória. Sabemos da geometria plana, que v pode ser escrita como:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{c}{\Delta t_{1\text{volta}}},$$

logo,

$$v = \frac{2\pi r}{T} \quad (2),$$

onde T é o período do movimento circular uniforme descrito pela pedra. De (2) em (1), temos:

$$a_{cp} = \frac{\left(\frac{2\pi r}{T}\right)^2}{r} = \frac{4\pi^2 r^2}{T^2 r} \quad \therefore \quad a_{cp} = \frac{4\pi^2 r}{T^2} \quad (3).$$

A primeira e a segunda Leis de Kepler tratam de trajetórias elípticas, entretanto, para o caso particular de uma trajetória circular na qual os focos coincidem, elipse de excentricidade 1, temos essas leis satisfeitas pela equação (3) – deduzida a partir do caso supra citado, porém generalizada para os planetas. E, para tanto, basta considerar a simetria de uma trajetória circular, observando, assim, que serão percorridas pelo raio vetor, áreas iguais em tempos iguais. Evidentemente, para o caso geral de uma trajetória elíptica, temos que a velocidade de um planeta ao longo de sua trajetória, será maior no periélio e menor no afélio, levando o raio vetor a varrer áreas iguais em tempos iguais.

A terceira Lei de Kepler nos diz que:

$$T^2 = k \cdot r^3,$$

na qual, T é o período de revolução do planeta em torno do Sol, r é a distância média do centro de massa do planeta ao centro de massa do Sol e k é a constante de proporcionalidade que caracteriza essa lei, logo:

$$k = \frac{T^2}{r^3} \quad (4).$$

Inserindo a terceira lei na equação (3), temos:

$$a_{cp} = \frac{4\pi^2 r}{kr^3} \quad \therefore \quad a_{cp} = \frac{4\pi^2}{kr^2} \quad (5).$$

Em “Philosophiae Naturalis Principia Mathematica⁷”, Newton enunciou os três axiomas que ficariam conhecidos como as Três Leis de Newton:

LEI I – Todo corpo permanece em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em linha reta, a menos que seja obrigado a mudar seu estado por forças impressas nele.

LEI II – A mudança do movimento é proporcional à força motriz impressa, e se faz segundo a linha reta pela qual se imprime essa força.

LEI III – A uma ação sempre se opõe uma reação igual, ou seja, as ações de dois corpos um sobre o outro sempre são iguais e se dirigem a partes contrárias. (NEWTON, 1983, p. 14).

Da segunda lei, também conhecida como Princípio Fundamental da Dinâmica (PFD), temos que para o nosso caso aqui de uma massa m constante:

$$\vec{f} = \frac{d\vec{p}}{dt} \quad \text{sendo} \quad \vec{p} = m\vec{v} \quad \text{temos:}$$

$$\vec{f} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} = m \frac{d\vec{v}}{dt}.$$

Como a derivada da velocidade em relação ao tempo é a aceleração, temos então que:

$$\vec{f} = m\vec{a}.$$

E podemos então aplicar essa relação para a equação 5, encontrando a força centrípeta que age sobre um planeta em sua trajetória em torno do Sol.

$$\vec{f}_{cp} = m\vec{a}_{cp}, \quad \text{em módulo:}$$

$$f_{cp} = m \frac{4\pi^2}{kr^2} \quad (6).$$

⁷ Princípios Matemáticos da Filosofia Natural

A equação (6) é um resultado válido para os planetas orbitando em torno do Sol.

Em “Duas Novas Ciências”, Galileu anunciou, em sua terceira jornada, como proposição II do teorema II que “se um móvel, partindo do repouso, cai com movimento uniformemente acelerado, os espaços por ele percorridos em qualquer tempo estarão entre si na razão dupla dos tempos, a saber, como os quadrados desses mesmos tempos” (GALILEO, 1985, p. 136).

A proposição acima resultou na mais famosa lei de Galileu, a lei da queda livre, onde⁸:

$$h = \frac{1}{2}gt^2 \quad (7),$$

na qual h é altura percorrida por um corpo em queda livre, t o tempo associado e g a aceleração de queda.

Derivando a equação (7) em relação ao tempo, obtemos:

$$v = \frac{dh}{dt} = gt \quad (8).$$

Derivando mais uma vez, obtemos a aceleração desse corpo durante a queda, a aceleração da gravidade.

$$a = \frac{dv}{dt} = g \quad (9).$$

Aplicando o PFD ao resultado acima, encontramos a força que age sobre o corpo durante sua queda livre.

⁸ De um ponto de vista histórico, a expressão (7) está imbuída da geometria analítica que foi um desenvolvimento de Descartes, um contemporâneo de Galileu. Galileu usou a geometria dos gregos, tal como no enunciado exibido no texto e não a geometria analítica que no fundo é uma confluência entre a geometria e a álgebra, ou seja, a algebrização da geometria. Para detalhes de uma discussão contextualizada, ver(Bastos Filho, 2012, p.65-83).

$$f = mg \quad (10),$$

onde m é a massa do corpo e f pode ser representado por P , uma vez que, a força em questão é a denominada força peso.

Nosso objetivo é entender a unificação de Newton da astronomia de Kepler com a Física de Galileu; isso é possível através da adoção de “um princípio explicativo universal que numa dada teoria universal é caracterizado por um parâmetro universal G e que a partir de G podemos concluir a respeito da relação de G com k , de G com g , e naturalmente de k com g através de G ” (BASTOS FILHO, 1995, p. 234).

Em nossa busca tomemos como conjectura de universalidade o produto da unificação de Newton traduzida na seguinte relação:

$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \quad (11),$$

onde m_1 e m_2 são duas massas quaisquer e r é a distância entre os seus respectivos centros de massa.

Igualemos a equação (11) a (6) que é um resultado válido para os planetas orbitando em torno do Sol e conseqüente das três leis de Kepler.

$$F = f_{cp}$$

$$G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} = \frac{m 4\pi^2}{k r^2}$$

Admitindo que m_1 é a massa do Sol, representada agora por m_{Sol} e $m=m_2$ é a massa do planeta em órbita, temos:

$$G = \frac{1}{k} \frac{4\pi^2}{m_{Sol}} \quad (12).$$

Quando igualamos m , que é a massa do planeta comparado em seu movimento a uma pedra que gira presa a um barbante, com m_1 , que é a massa do mesmo planeta sofrendo atração gravitacional por parte do Sol, estamos

demonstrando grande ousadia que no anacronismo de nossa reconstrução racional nos mostra que Newton, presumivelmente, admitiu a equivalência entre massa inercial⁹ e massa gravitacional¹⁰.

Sabemos que a equação (12), relação entre o parâmetro G pertencente à Gravitação Universal e o parâmetro K pertencente à Astronomia de Kepler, demonstra que a condição de universalidade de G depende da universalidade de:

$$k \cdot m_{\text{Sol}} \quad (13),$$

E, dessa forma, podemos generalizar para:

$$k_{\text{Terra}} \cdot m_{\text{Sol}} = k_{\text{Lua}} \cdot m_{\text{Terra}} \quad (14).$$

Fazendo a inserção da Terceira Lei de Kepler 4 em 14, encontramos:

$$m_{\text{Terra}} = \left(\frac{T_{\text{Terra}}}{T_{\text{Lua}}} \right)^2 \times \left(\frac{r_{\text{Lua}}}{r_{\text{Terra}}} \right)^3 \cdot m_{\text{Sol}} \quad (15)$$

A equação acima nos permite encontrar a massa de um planeta a partir do seu período de translação, do período de translação de um satélite natural seu e dos raios das órbitas, sua e de seu satélite, e ainda em função da massa do Sol.

Façamos um teste de validade utilizando os dados elencados abaixo e divulgados pela National Aeronautics and Space Administration (NASA).

$$T_{\text{Terra}} = 365 \text{ dias};$$

$$T_{\text{Lua}} = 27 \text{ dias};$$

$$R_{\text{ÓrbitaTerra}} = 149.598.262 \text{ km};$$

$$R_{\text{ÓrbitaLua}} = 384.400 \text{ km};$$

$$m_{\text{Sol}} = 1.989.100 \cdot 10^{24} \text{ kg}.$$

⁹ Tendência que um corpo possui de conservar o seu movimento retilíneo uniforme.

¹⁰ Reação do corpo ao campo gravitacional.

$$m_{\text{Terra}} = \left(\frac{365 \text{ dias}}{27 \text{ dias}} \right)^2 \times \left(\frac{384.400 \text{ km}}{149.598.262 \text{ km}} \right)^3 \cdot 1.989.100 \cdot 10^{24} \text{ kg}$$

$$m_{\text{Terra}} = 6.168.731 \cdot 10^{18} \text{ kg}$$

Encontramos assim a massa da Terra que difere do valor fornecido pela NASA, de $5.972.190 \cdot 10^{18} \text{ kg}$, em apenas 3,3% sendo, portanto, uma conjectura válida.

2.5.2 Relacionando G com g

A equação (11) aplicada a um corpo que se encontra a uma altura h , em relação à superfície da Terra, levará à equação:

$$F = G \frac{m_{\text{Terra}} \cdot m_{\text{corpo}}}{(r+h)^2} \quad (16).$$

Como $r_{\text{Terra}} \gg h$ podemos desprezar h , admitindo assim F constante, de tal modo a poder igualar (16) a (10),

$$F = f$$

$$G \frac{m_{\text{Terra}} \cdot m_{\text{corpo}}}{r_{\text{Terra}}^2} = m_{\text{corpo}} \cdot g$$

$$g = G \frac{m_{\text{Terra}}}{r_{\text{Terra}}^2} \quad (17)$$

A equação (16) estabelece a relação existente entre o parâmetro universal G e o parâmetro característico da Física de Galileu g , mas, para tanto, precisamos admitir um F constante através da exclusão de h , admitido aqui de valor desprezível em relação à r_{Terra} , observando que, em (17), r_{Terra} representa o raio da Terra e não de sua órbita como nas equações anteriores. Mais uma vez demos um ousado salto conjectural em prol da unificação realizada por Newton.

Isolando o parâmetro universal G , obtemos:

$$G = g \frac{r_{\text{Terra}}^2}{m_{\text{Terra}}} \quad (18)$$

Equação análoga, em sua função, a equação (12),

$$G = \frac{1}{k} \frac{4\pi^2}{m_{\text{Sol}}} \quad (12)$$

Sendo a primeira uma relação entre o parâmetro universal G e o parâmetro característico da Física de Galileu g e, a segunda uma relação com o parâmetro universal G e o parâmetro característico da Astronomia de Kepler k .

2.5.3 Relacionando g com k : Teste Final

Façamos agora, e por fim, o teste conjectural da universalidade de g em relação à k através de G , para tal feito igualemos (12) a (18) e façamos a inserção de (4) em (15).

$$g \frac{r_{\text{Terra}}^2}{m_{\text{Terra}}} = \frac{1}{k} \cdot \frac{4\pi^2}{m_{\text{Sol}}}$$

$$g = \frac{4\pi^2 \cdot m_{\text{Terra}}}{r_{\text{Terra}}^2 \cdot m_{\text{Sol}}} \cdot \frac{1}{k}$$

$$g = \frac{4\pi^2}{r_{\text{Terra}}^2 \cdot m_{\text{Sol}}} \cdot \left(\frac{T_{\text{Terra}}}{T_{\text{Lua}}} \right)^2 \cdot \left(\frac{r_{\text{órbita Lua}}}{r_{\text{órbita Terra}}} \right)^3 \cdot m_{\text{Sol}} \cdot \frac{R_{\text{órbita Terra}}^2}{T_{\text{Terra}}^2} \cdot \frac{r_{\text{Terra}}}{r_{\text{Terra}}}$$

$$g = \frac{4\pi^2 \cdot r_{\text{órbita Lua}}^2}{r_{\text{Terra}}^3 \cdot T_{\text{Lua}}^2} \cdot r_{\text{Terra}}$$

$$g = \frac{4\pi^2}{T_{\text{Lua}}^2} \cdot \left(\frac{r_{\text{órbita Lua}}}{r_{\text{Terra}}} \right)^3 \cdot r_{\text{Terra}}$$

Aplicando os valores já citados com o raio da Terra, também obtido no site da NASA, como sendo 6.371,00 km, temos:

$$g = \frac{4 \cdot 3,14^2}{(27 \cdot 24 \cdot 3600\text{s})^2} \cdot \left(\frac{384.400\text{km}}{6.371\text{km}} \right)^3 \cdot 6.371.000\text{m}$$

$$g = 10,14 \text{ m/s}^2$$

O valor encontrado como resultado do teste da conjectura de universalidade do G de Newton com o g generalizado de Galileu e o k generalizado de Kepler revela grande concordância, uma vez que difere do valor real de $9,81 \text{ m/s}^2$ em apenas 3,4%.

2.6 ABDUÇÃO

Muitos acreditam que Isaac Newton, ao realizar essa unificação, utilizou o método da indução ou dedução, como, em algumas etapas, assim o fizemos. Entretanto, segundo Popper em “Conjecturas e Refutações”, isso jamais poderia ter ocorrido, pois, para Popper (1972, p. 24) a indução é “uma argumentação tal que, dadas algumas premissas empíricas (singulares ou particulares), leva a uma conclusão universal, a uma teoria universal, seja com uma certeza lógica, seja ‘probabilisticamente’ (no sentido em que este termo é utilizado no cálculo de probabilidades)”.

Popper defende a inconsistência em se atribuir à Gravitação Universal de Newton um resultado alcançável indutivamente tomando como premissas os resultados de ambas, tanto da Astronomia de Kepler, quanto da Física de Galileu. Essa inconsistência foi evidenciada em diversos momentos de nossa reconstrução racional, a saber, nas palavras de Popper:

A teoria de Galileu sobre a queda dos corpos continha uma constante, g , a constante da aceleração. Segundo a teoria de Newton, g não é uma constante, mas uma variável que depende (a) da massa do corpo atraente (no caso de Galileu, a Terra), e (b) da distância do centro de massa. Para qualquer sistema de dois corpos dos quais um é muito pesado, e o outro de peso desprezível, podemos derivar as três leis de Kepler da teoria de Newton e conseqüentemente explicá-las. Mas, desde que Kepler formulou suas leis para um sistema de muitos corpos consistindo do somatório de vários planetas, elas são, do ponto de vista da teoria de Newton, inválidas. Assim, essas leis não poderiam constituir um sistema seja parcial, seja total de premissas (indutivas ou dedutivas) da teoria de Newton. (POPPER, 1972, p. 24).

Popper refere-se à possibilidade de derivar as três leis de Kepler da Teoria da Gravitação Universal, e isso pode ser feito a partir do caso particular de um satélite, descrevendo uma trajetória circular em torno de um planeta, obviamente sem perda de generalidade.

A única força que atuaria sobre o satélite seria a força de atração gravitacional que sabemos valer:

$$F = G \frac{m_{\text{planeta}} \cdot m_{\text{satelite}}}{r_{\text{órbita}}^2} \quad (13).$$

Lembre-mo-nos da Segunda lei de Newton que o satélite é acelerado em direção ao Sol,

$$f = m_{\text{satelite}} \cdot a_c \quad (14).$$

Como o movimento descrito pelo satélite seria um movimento circular uniforme, uma vez que no caso da trajetória circular os focos da elipse coincidem, temos para aceleração centrípeta,

$$a_c = \omega^2 r_{\text{órbita}} \quad (15),$$

onde ω é a velocidade angular dada por:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (16).$$

A equação acima indica que um ângulo 2π foi percorrido em uma volta completa em um tempo igual ao período de revolução T . Inserindo (16) e (15) em (14) temos,

$$f = \frac{4\pi^2 \cdot m_{\text{satelite}} \cdot r_{\text{órbita}}}{T^2} \quad (17).$$

Por fim, igualando (13) a (17), obtemos uma equação que representa a terceira lei de Kepler, sendo válida também, para as duas primeiras:

$$F = f$$

$$G \frac{m_{\text{planeta}} \cdot m_{\text{satelite}}}{r_{\text{órbita}}^2} = \frac{4\pi^2 \cdot m_{\text{satelite}} \cdot r_{\text{órbita}}}{T^2}$$

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{G \cdot m_{\text{planeta}}} \cdot r_{\text{órbita}}^3$$

Podemos também citar, contra a possibilidade de indução – e ainda que desprezando a contradição epistemológica entre a Gravitação Universal, enquanto conclusão, e a Astronomia de Kepler mais a Física de Galileu, enquanto premissas – o problema da validade do procedimento indutivo que trata do tempo e da certeza de imutabilidade da natureza.

Todas as inferências extraídas da experiência supõem, como fundamento, que o futuro se assemelhará ao passado e que poderes semelhantes estarão unidos a qualidades sensíveis semelhantes. Se houvesse alguma suspeita de que o passado não servisse de regra para o futuro, toda a experiência se tornaria inútil e não poderia dar origem a nenhuma inferência ou conclusão. É possível, portanto, que argumentos extraídos da experiência possam provar a semelhança entre o passado e o futuro, visto que todos os argumentos desse tipo fundam-se na suposição dessa semelhança. Mesmo se admitindo que o curso das coisas sempre regular foi, sem nenhum argumento ou inferência nova, não prova que no futuro continuará assim. (HUME *apud* ABBAGNANO, 2007, p. 558).

Mas se Newton não realizou sua unificação através do método da indução ou dedução, então, como pode tê-la feito?

Peirce identificou a abdução como método de concepção das leis de Kepler elegendo tal caso como o maior dos exemplos desse método.

A cada estágio de sua longa investigação, Kepler apresenta uma teoria aproximadamente verdadeira, uma vez que satisfaz de maneira aproximada as observações, e ele apenas modifica a teoria depois de uma reflexão cuidadosa e minuciosa, de modo a torná-la mais racional ou próxima do fato observado. Assim, nunca modificando sua teoria caprichosamente, mas sempre através de motivos racionais, quando ele finalmente chega a uma mudança – de grande simplicidade e racionalidade – que satisfaz plenamente a observação, ela destaca um fundamento lógico totalmente diferente do que seria se tivesse surgido ao acaso. Kepler mostra seu aguçado senso de lógica nos detalhes de todo o processo pelo qual ele finalmente chegou à verdadeira órbita. E essa é a obra prima do raciocínio retrodutivo¹¹. (SILVA, 2007, p. 134).

Em resposta a essa pergunta, tal como para Kepler na determinação das trajetórias dos planetas, temos Peirce (1974, p. 53) ao afirmar que “Tem que se

¹¹ Peirce introduziu o termo *abduction* (ou *retroductión*) para indicar o primeiro momento do processo indutivo, o da escolha de uma hipótese que possa servir para explicar determinados fatos empíricos. (Coll. Pap., *apud* Abbagnano, 2007, p.13).

estar completamente louco para negar que a ciência fez muitas descobertas verdadeiras. Mas todos os elementos de teoria científica que foram estabelecidos até hoje foram-no através da Abdução”. A abdução posiciona-se aqui como único método capaz de unir céus e terra dando a uma maçã o poder de se comportar segundo as leis de um planeta e, portanto, como única possibilidade de concepção da adoção de Newton da conjectura de universalidade.

3 MODELOS MENTAIS

Analisamos o grande feito de Newton constituído pela concepção da teoria da Gravitação Universal. Lembremos aqui que os nossos propósitos são muito mais centrados em uma reconstrução racional e pedagógica do episódio do que propriamente de uma abordagem histórica do mesmo. Construir objetos de aprendizagem que tornem a Física produzida nesse episódio de sua história cognoscível para os estudantes do ensino médio e superior é objetivo de nosso trabalho. Para alcançá-lo, precisamos de uma teoria de aprendizagem que nos norteie. Segundo Lima e Nuñez (2004), é preocupação corrente da filosofia, da sociologia e da educação científica entender a natureza e a construção do conhecimento. Mas como opera o mecanismo de aquisição¹² de conhecimento?

No meio educacional, elegeram-se as representações do mundo real em forma de modelos científicos como tentativa de compreender e explicar os fenômenos naturais. Para se chegar às leis e teorias, a ciência tem partido de representações de caráter provisório, modelos elaborados para viabilizar a compreensão e explicação de conceitos abstratos. Modelos podem ser definidos segundo diversos autores:

Os modelos representam uma imagem particularizada de um aspecto da realidade e por definição seriam incompletos, em relação ao sistema que pretende representar (referente ou sistema objeto) que normalmente é um sistema complexo. (CASTRO apud LIMA, NUÑEZ 2004, p. 246).

Os modelos são um processo representacional que faz uso de imagens, analogias e metáforas, para auxiliar o sujeito (aluno ou cientista) a visualizar e compreender o referente, que pode se apresentar como de difícil compreensão, complexo e abstrato, e/ou em alguma escala perceptivelmente inacessível. (POZO, CRESPO apud LIMA, NUÑEZ 2004, p. 246).

Os modelos são considerados ferramentas de representação teórica do mundo, auxiliando a sua explicação, predição e transformação. (GALAGOVSKY, ADÚRIZ-BRAVO apud LIMA e NUÑEZ 2004, p. 246).

Como resposta à nossa pergunta, adotamos os modelos mentais, representações amplas de episódios, podendo ser compostas por pessoas, por objetos e por acontecimentos, todos organizados segundo parâmetros de tempo,

¹² A palavra **aquisição** enseja uma grande amplitude de concepções e pode ser entendida de diversas maneiras a depender do que se entenda por conhecimento prévio e por conhecimento construído social, histórico e culturalmente. Diante do pântano conceitual em torno desta palavra que vai além do que dissemos na frase anterior, então é recomendável dizer que vamos nos ater às concepções ligadas às teorias que lançaremos mão aqui neste trabalho.

espaço, intenções determinadas pelos episódios e relações de causalidade. (COLL; MARCHESI; PALACIOS, COLS, 2004). Segundo seu principal pesquisador, Johnson-Laird (2005), os modelos mentais surgem como uma resposta para nossas principais dúvidas acerca de nossa percepção, raciocínio e aquisição de conhecimento, e ainda, definem como interagimos com o mundo, como dito abaixo:

Qual o resultado final da percepção? Qual a capacidade da compreensão linguística? Como prevemos o mundo e tomamos decisões sensatas sobre o que fazer? O que está por trás do pensamento e do raciocínio? Uma resposta para essa questão é que nós contamos com modelos mentais do mundo. A percepção produz modelos mentais, a compreensão linguística produz modelos mentais, e o pensamento e o raciocínio são manipulações internas desses modelos¹³. (JOHNSON-LAIRD, 2005, p.1, tradução nossa).

Encerramos o capítulo anterior afirmando que Newton concebeu a Gravitação Universal através do processo da abdução, sendo esse um processo mental, e nos remetendo à necessidade de entendê-lo, a fim de fornecermos subsídios para que o mesmo aconteça na mente dos estudantes. Entendemos que por indução revisitamos lugares já conhecidos na teoria, na medida em parte da inferência segundo a qual *'se alguns são, então todos são'* e que por dedução jamais chegaremos ao novo na medida em que apenas concluímos estritamente o que for logicamente necessário de ser concluído a partir das hipóteses adotadas e das regras lógicas de inferência e nada mais e que somente por abdução inventamos teorias e ideias novas que podem explicar os fenômenos e os fatos. Mas Peirce (1974) nos forneceu bem mais que essas concepções, ele deixou uma semente no tempo que brotou em um novo legado e dele faremos uso nesse segundo momento de nosso trabalho.

3.1 MODELOS MENTAIS

De acordo com Johnson-Laird (2004), foi o sistema de lógica conhecido como Cálculo de Predicados de Peirce que permitiu a lógica lidar com a negação e, posteriormente, levou ao desenvolvimento da Teoria da Representação do Discurso, tendo como produto final a Teoria dos Modelos Mentais. Mas, ainda segundo o

¹³ What is the end result of perception? What is the output of linguistic comprehension? How do we anticipate the world, and make sensible decisions about what to do? What underlies thinking and reasoning? One answer to these questions is that we rely on mental models of the world. Perception yields a mental model, linguistic comprehension yields a mental model, and thinking and reasoning are the internal manipulations of mental models. (JOHNSON-LAIRD, 2005, p. 1).

mesmo autor, Wittgenstein também colaborou com a Teoria dos Modelos Mentais ao defender uma teoria de significado da imagem, na qual temos os seguintes postulados:

- 2.11 Nós criamos imagens dos fatos para nós mesmos;
- 2.12 Essa imagem é um modelo da realidade;
- 2.13 Os objetos correspondem, na imagem, aos elementos dessa imagem;
- 2.15 Os elementos da imagem se combinam uns com outros de um modo definitivo, o que representa que as coisas, então, combinam entre si;
- 2.17 O que a imagem precisa ter em comum com a realidade, de modo a ser capaz de representá-la à sua maneira – seja ela verdadeira ou falsa – é a sua forma de representação¹⁴. (WITTGENSTEIN apud JOHNSON-LAIRD, 2004, p. 3, tradução nossa).

Outros pensadores, antes de Peirce e pertencentes ao século 19, anteciparam a Teoria dos Modelos Mentais. Dentre eles, temos o físico Lord Kelvin referindo-se a modelos mecânicos na construção de teorias científicas ao afirmar:

Eu nunca estou satisfeito até conseguir fazer um modelo mecânico. Se eu posso fazer um modelo mecânico de alguma coisa, então eu posso entendê-la. Se eu não posso fazer o modelo, então não posso entender; e é por isso que eu não entendo a Teoria Eletromagnética¹⁵. (LORD KELVIN, apud JOHNSON-LAIRD, 2004, p. 180, tradução nossa).

Segundo Moreira (1996), não captamos o mundo diretamente, construímos representações mentais internas. Uma representação mental ou modelo mental é uma emulação de uma experiência específica, sendo produzido na memória de curto prazo (MCP) e, por ser esta de pouco espaço, o modelo mental pode conter dados estilizados, sendo os mesmos reduzidos de forma semelhante às nossas experiências corporalizadas sobre o mundo (COLL; MARCHESI; PALACIOS, COLS, 2004), por exemplo:

Assim como em um espaço real estão mais à vista do personagem objetos situados em seu campo visual e no sentido de sua marcha, também no espaço representacional do modelo estão mais acessíveis os objetos situados à frente e dos lados do personagem do que os situados atrás. (VEGA, RODRIGO, ZIMER apud COLL, MARCHESI, PALACIOS, COLS, 2004, p. 84).

¹⁴ 2.1 We make to ourselves pictures of facts;

2.12 The picture is a model of reality;

2.13 To the objects correspond in the picture the elements of the picture;

2.15 That the elements of the picture are combined with one another in a definite way, represents that the things are so combined with one another;

2.17 What the picture must have in common with reality in order to be able to represent it after its manner— rightly or falsely — is its form of representation.

¹⁵ I never satisfy myself until I can make a mechanical model of a thing. If I can make a mechanical model I can understand it. As long as I cannot make a mechanical model all the way through I cannot understand; and that is why I cannot get the electro-magnetic theory. (LORD KELVIN, apud JOHNSON-LAIRD, 2004, p. 180).

Alguns cognitivistas contribuíram e ainda contribuem com a construção da Teoria dos Modelos Mentais, mas, segundo Quelhas (1999) e Moreira (1996), a Teoria dos Modelos Mentais à luz de Johnson-Laird (1983) tem sua originalidade no fato de encarar os modelos mentais como representações com estrutura análoga às concepções humanas das situações que originam esses modelos mentais. Por exemplo, inferências com elevado nível de dificuldade necessitam de mais modelos mentais para se chegar a uma conclusão.

3.1.1 Representações Proposicionais, Representações Analógicas e os Modelos Mentais

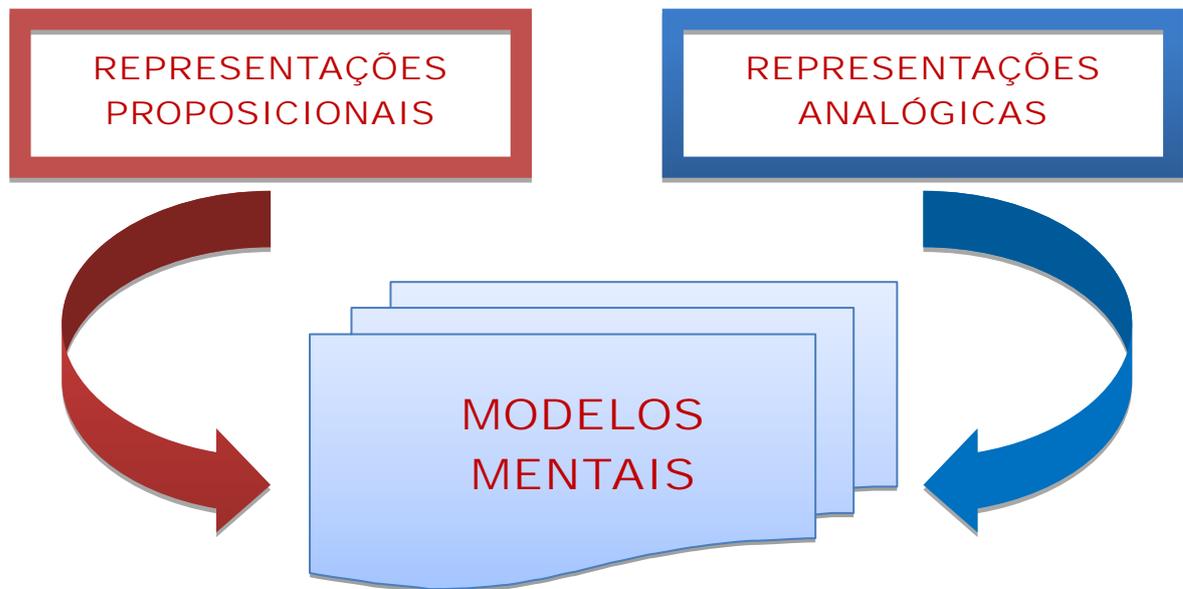
O estudo da mente não é um privilégio exclusivo das últimas décadas. Platão, por exemplo, em sua *Alegoria das Cavernas*, tratou do mundo das ideias e de seus reflexos que seriam os objetos reais. Descartes, comungando com Platão, defendeu que as ideias são inatas ao homem. E ambos encontraram dissonância em John Locke, Hume e Berkeley, que consideraram o conhecimento como fruto das percepções dos sentidos. Kant, em sua *Crítica da Razão Pura*, sintetizou essa oposição de ideias. Depois nasceu o Behaviorismo e, por fim, o Cognitívismo. Sendo este último uma convergência de pesquisas nas áreas da Filosofia, Psicologia, Linguística, Computação e Neurociências (ARRUDA, 2003). A Psicologia Cognitiva deve muito a sua existência ao advento do computador, pois ele se tornou uma metáfora da mente. "Precisamos aceitar que, em determinados pontos, computadores e humanos são suficientemente parecidos para que certos aspectos de um possam ser usados como modelos para certos aspectos de outro". (LEFRANÇOIS, 2012, p. 282). Ainda, acerca da metáfora da mente como um computador, Capurro (1991) destaca que:

(...) os seres humanos são processadores biológicos de informação. A informação é realidade duplamente codificada... A ciência da informação pretende estudar a informação em si mesma, ou seja, contribuir para sua análise e sua construção.". (CAPURRO, 1991, p. 3).

Dentro da Psicologia Cognitiva, existe uma divisão de opiniões quanto à forma como o conhecimento humano é processado dentro de nossas mentes. Uns defendem que é na forma de representação proposicional, que é do tipo digital, e outros que é na forma de imagem, que é do tipo analógica. E, como proposta

alternativa, temos os modelos mentais que são modelos em pequena escala da realidade (ARRUDA, 2003; MOREIRA, 1996; JOHNSON-LAIRD, 1983), como o representado no esquema abaixo:

Figura 1 – Modelos mentais como uma possibilidade conciliadora entre os imagistas e os analógicos



Fonte: elaborado pelo autor.

Para Moreira (1996), os modelos mentais propostos por Johnson-Laird são uma forma de construto representacional em que *proposições* são processadas de maneira semelhante à linguagem de máquinas, em uma espécie de "mentals"¹⁶. Eles representam significados abstraídos de estados de coisas e são verbalmente expressáveis. Imagens são representações específicas que contêm muitos detalhes perceptíveis de um objeto ou situação, vistos de um ângulo particular. Os modelos mentais são análogos às impressões fornecidas pelos sentidos. As informações, em um modelo mental, são atualizadas a cada nova informação captada por nossos sentidos podendo, ainda, sofrer inferências episódicas inteligentes, consequentes da emulação da situação. De acordo com Arruda (2003), representações na forma de proposições ou de imagens são categorias que devem ser vistas como extremos de uma situação contínua. A exemplo, temos o esquema abaixo:

¹⁶ Neologismo utilizado pelo autor, cujo significado é "língua mental".

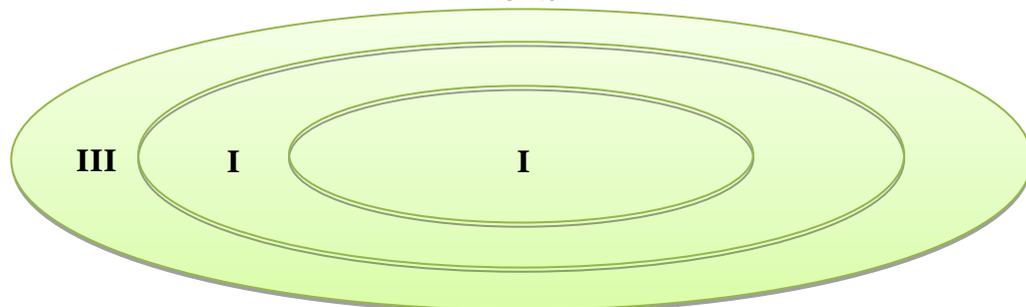
Figura 2 – Distinção de categorias de representação como imagem e como proposição, adaptado de Arruda (2003)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Apesar de defendermos o enfoque de Johnson-Laird, é válido citarmos a esquematização feita por Borges (1997), que organiza as conceituações por diversas autorias dos modelos mentais. Nela o conceito evolui a partir de um núcleo e em camadas indo do comum ao restritivo. Segue abaixo o referido esquema com sua respectiva legenda na qual constam os referenciais utilizados pelo autor.

Figura 3 – Esquema de Borges (1997) sobre as diferentes concepções de Modelo Mental



I - O comportamento de uma pessoa é melhor explicado em termos do conteúdo de sua mente, dos conhecimentos e das crenças de tal pessoa, independente de quaisquer mecanismos mentais. (Gentner e Stevens, 1983; Shipstone, 1985; Osborne, 1983).

II - Acrescenta-se o pressuposto de que uma pessoa faz inferências e previsões manipulando seus modelos mentais, numa forma de simulação mental. (de Kleer e Brown, 1981; Williams, Hollan & Stevens; 1983).

III - Supõe que os modelos mentais são estruturalmente análogos aos sistemas que eles representam e que os mesmos tipos de modelos podem ser construídos através da percepção, da imaginação ou de leitura. (JOHNSON-LAIRD apud BORGES, 1997, p. 210).

Desde os primeiros estudos de Johnson-Laird, que remetem a 1983, a teoria dos modelos mentais forneceu boas contribuições quanto à forma de compreendermos e memorizarmos um texto. Defende-se que existem três níveis de representação de um texto. A primeira é superficial e trata da identificação das palavras e do reconhecimento de suas relações sintáticas e semânticas, sendo retida por pouco tempo e logo desvanecendo com o final da leitura da frase; a segunda forma é a proposicional e trata das relações lógicas entre os significados das palavras possuindo uma persistência maior em nossa memória levando-nos a lembrar do sentido do texto ainda que esqueçamos as palavras exatas que compõem o mesmo; a terceira forma de representação é a situacional, a qual nos fornece dados que permitem avaliar a coerência das relações emocionais dos personagens, seus estados mentais e suas mudanças de perspectivas, necessitando de um processamento de maior riqueza de critérios e de informações, o que tem como consequência uma maior compreensão e persistência na memória. (COLL; MARCHESI; PALACIOS, COLS, 2004).

O foco de nossa pesquisa está nos modelos que o estudante cria ao assistir uma exposição teórica do professor, na qual comumente lidamos com conteúdos mais abstratos, diferentes de modelos situacionais mais simples. (RODRIGO apud COLL, MARCHESI, PALACIOS, COLS, 2004). Estes, provavelmente, são construídos durante o primeiro ano de vida e baseiam-se em conhecimentos acerca da causalidade física e de psicologia intuitiva, quanto às relações de apego entre os agentes. Um exemplo simples relacionado com a causalidade física e com a psicologia intuitiva é o do interruptor da lâmpada. As crianças se maravilham quando descobrem o elo causal entre ligar um interruptor e o acendimento de uma lâmpada e o desligamento do interruptor e o apagamento da lâmpada. Se isso for repetido à exaustão, o elo causal se estabelece na mente da criança por **indução**: *' se algumas vezes em que eu ligar o interruptor eu acendo a lâmpada e se eu desligá-lo eu apago, então todas as vezes que eu repetir isso acontece exatamente desta maneira'*. Esta é uma inferência indutiva obtida pelo hábito e pela psicologia intuitiva, mas não há garantia lógica para que seja assim em qualquer caso, pois pode haver contraexemplos. No entanto, se eu propuser uma teoria explicativa, baseada em um princípio explicativo segundo a qual desligar o interruptor significa abrir o circuito e impedir que a corrente passe e ligar o interruptor significa fechar a corrente e portanto permitir a passagem da corrente para acender a lâmpada isso não é mais

indução e sim um princípio explicativo geral. Em suma, é uma explicação cognitivamente superior àquela anterior meramente baseada no hábito e na indução: Além disso, é possível ainda realizarmos progresso cognitivo ao trabalharmos em conexão com o princípio explicativo segundo o qual a corrente elétrica flui quando está presente alguma diferença de potencial. E aí a explicação baseada em princípios é de um grau cognitivamente superior àquelas de lavra meramente indutiva as quais se constituem meramente em uma constatação baseada em hábito e em costume.

3.1.2 Modelo Proposicional e Representação Proposicional

Para Arruda (2003) e Moreira (1996), um modelo mental pode ser totalmente analógico, como no caso imagístico, ou pode ser parcialmente analógico e parcialmente proposicional. Há uma diferença entre um modelo proposicional e uma representação proposicional. Na representação proposicional, as regras usadas não são interconectadas, o que não permite a avaliação de uma situação diferente da representada. Já o modelo proposicional é constituído por regras articuladas, o que permite, ao contrário da representação proposicional, explicar conceitos e extrapolar conclusões para situações diferentes daquela que originou o modelo proposicional.

Em Moreira (1996), temos relato de uma experiência feita por Johnson-Laird e Mani (1982), na qual dois grupos receberam descrições de um arranjo espacial. Um dos grupos recebeu descrições de posições exatas de cada objeto e o outro, descrições ambíguas. O primeiro grupo foi capaz de inferir informações espaciais adicionais, mas tiveram dificuldade em lembrar as exatas informações recebidas. Já o segundo grupo, com poucas exceções, foi incapaz de realizar inferências espaciais adicionais, mas tiveram facilidade, comparados ao outro grupo, em recordar as descrições verbais. A interpretação dada aos resultados é de que o primeiro grupo formou um modelo mental passando a confiar nele e adquirindo independência em relação às recordações literais de descrições verbais detalhadas. Já os sujeitos do segundo grupo, devido à possibilidade de inúmeros modelos mentais, se detiveram, aparentemente, às representações mentais das proposições verbalmente expressáveis.

3.1.3 Modelos Conceituais e Modelos Mentais

O foco de nossa construção é o caso da unificação tratado no capítulo anterior com todos os conceitos pertinentes. Esses conceitos descrevem estados de coisas e, por isso, demandam a criação de modelos mentais que, se adequados, representarão em seus núcleos não só o essencial do conceito, mas representarão também a amplitude de estados de coisas implicadas por ele. O mesmo estado de coisas pode ser representado por diferentes modelos mentais que serão estruturados de maneira adequada ao uso que se pretende dele. Como exemplo, imaginemos o modelo mental de um carro de Formula 1. O modelo poderia possuir diversas versões, de acordo com o que se pretende dele (que pode ser falar sobre o carro, pilotá-lo ou construí-lo). Pensando ainda sobre a concepção dessas versões, pode-se considerar a cultura, a idade e mesmo a competência do piloto. Nesse ponto, percebemos o aspecto idiossincrático dos modelos mentais. Cada versão possuíra em seu núcleo a identificação do modelo como sendo de um carro de Formula 1. (MOREIRA, 1996). Chegamos a um ponto em que precisamos ter a preocupação de entender que um modelo mental é algo distinto de um modelo conceitual como expresso a seguir:

(...) modelos conceituais são projetados como instrumentos para a compreensão ou para o ensino de sistemas físicos, modelos mentais são o que as pessoas realmente têm em suas cabeças e o que guia o uso que fazem das coisas. (GENTER e STEVENS, apud MOREIRA, 1996, p. 5).

Em ensino de ciências e em relação aos modelos conceituais, é importante destacarmos a tipologia de Justi e Gilbert (apud LIMA, NUÑEZ, 2004), na qual um modelo é a representação de algo (um objeto, um processo, um acontecimento, um sistema), tendo como origem uma atividade mental que, quando expressa, é chamada de modelo expresso; quando se torna consenso dentro de um grupo social, é chamada de modelo consensual; quando aceita pela comunidade científica é denominada modelo científico; quando considerada junto ao contexto histórico de sua criação é chamada de modelo histórico; e, por fim, quando elaborada com o objetivo de propiciar a compreensão dos estudantes de modelos consensuais ou históricos, e expressas em forma de objetos, gráficos, esquemas, mapas e imagens em geral, são denominadas modelos de ensino.

3.1.4 Modelos Mentais e Seus Princípios

Johnson-Laird (apud MOREIRA, 1996), na busca pela diferenciação dos modelos mentais em relação a outras construções mentais, postula nove princípios aos quais os modelos mentais obedecem. Eles são: o princípio da finitude, do construtivismo, da economia, da não-indeterminação, da predicabilidade, do inatismo, do número finito de primitivos conceitos e da identidade estrutural, como descrito abaixo:

- i. Princípio da Finitude – Modelos mentais são finitos e representam domínios finitos;
- ii. Princípio do Construtivismo – Modelos mentais são construídos a partir de elementos básicos, tijolos nominados "tokens";
- iii. Princípio da Economia – Um estado de coisas é representado por um único modelo mental, porém o contrário não se verifica, pois o modelo mental é revisado recursivamente à medida que se julgar necessário, podendo passar a representar mais estados de coisas;
- iv. Princípio da Não-indeterminação – Somente quando computacionalmente tratável, o modelo mental pode representar indeterminação;
- v. Princípio da Predicabilidade – Predicados diferentes podem ser aplicados a termos diferentes, desde que exista uma intersecção entre as aplicações dos termos;
- vi. Princípio do Inatismo – Todos os conceitos primitivos são inatos;
- vii. Princípio do Número Finito de Primitivos Conceitos – Os conceitos mais complexos são construídos a partir de um conjunto finito de operadores semânticos que pertencem a campos semânticos correspondentes e originados por um conjunto finito de conceitos primitivos;
- viii. Princípio da Identidade Estrutural – Os estados de coisas produzem modelos mentais como análogos estruturais.

Existem autores que definem mais princípios, porém, considerando que nosso enfoque está na abordagem de Johnson-Laird, não nos deteremos a utilizá-los como critério de análise em nossa pesquisa. Note que a Teoria dos Modelos Mentais contempla, sem exclusão mútua, princípios inatos e princípios construídos na evolução dos campos conceituais em desenvolvimento.

3.1.5 Raciocínio Dedutivo e os Modelos Mentais

Consideramos de grande importância tornar claro que o objetivo de nossa pesquisa não é analisar o raciocínio de Newton, no caso da unificação, à luz dos modelos mentais de Johnson-Laird, pois já analisamos como tudo isso pode ser concebido à luz de uma reconstrução racional independentemente de sua fidelidade ou não ao processo histórico no caso da unificação da física de Galileu com a astronomia de Kepler. Apesar de considerarmos esse um objetivo alcançável, deixaremos o mesmo para momentos futuros. Dito isso, temos que, para Johnson-Laird (apud QUELHAS, 1999), o processo de dedução passa por três etapas de raciocínio. A primeira etapa consiste em o estudante, baseado em seus conhecimentos gerais e nas características específicas do problema, idealizar como seria o cenário se as premissas assumidas forem verdadeiras, construindo um modelo de estado de coisas de acordo com as premissas adotadas. Essa é a fase da compreensão. A fase seguinte é a de descrição. Nela, a partir dos modelos elaborados na fase anterior, o estudante tenta chegar a uma conclusão que afirme algo diferente do afirmado nas premissas. A terceira e última fase é a em que o estudante construirá modelos alternativos buscando os chamados contraexemplos da conclusão original. Não encontrando contraexemplos, a conclusão inicial é validada. Caso os encontre, retorna à fase anterior até chegar a uma conclusão que satisfaça todos os modelos. Essa fase é chamada de validação.

Ainda segundo Johnson-Laird (apud QUELHAS, 1999), falhas na busca de contraexemplos devem-se a limitações na capacidade de tratamento da memória de trabalho ou por a conclusão inicial ir de encontro às crenças do estudante. Por isso a busca de modelos alternativos pode ser abandonada. Essa última é algo com o qual devemos nos preocupar ao conduzir nossas exposições teóricas em sala de aula.

De acordo com essa teoria, o desenvolvimento das habilidades do raciocínio se deve, principalmente, a três fatores: a capacidade linguística, para poder perceber o sentido das premissas; a capacidade da *memória de trabalho*, que é "onde ficam os resultados parciais de processos inferenciais" (QUELHAS, 1999, p. 3); e a capacidade de buscar contraexemplos, que, como já discutimos, permite raciocinar dedutivamente, uma vez que o sujeito torna-se capaz de pensar sobre seu próprio raciocínio, entendendo, assim, o conceito de validade e podendo, portanto, validar suas conclusões. Para Johnson-Laird (1990), as capacidades da memória de

trabalho e a linguagem devem-se, em parte, à carga genética e, em parte, a experiências sociais, desenvolvendo-se na infância.

Em resumo:

(...) toda arquitetura do raciocínio dedutivo ergue-se sobre a capacidade do sujeito para elaborar representações internas da realidade. Se o processo inferencial partir de modelos mentais que não representam adequadamente as premissas e a relação entre os constituintes, o resultado será necessariamente uma conclusão inválida. (QUELHAS, 1999, p. 3).

Dessa forma, ao elaborarmos uma exposição teórica, precisamos ter em mente a preocupação de conduzi-la de modo a favorecer a elaboração, por parte dos estudantes, de modelos mentais que representem adequadamente as premissas envolvidas nos processos dedutivos nos quais queremos que se envolvam para que, findado esse processo, os estudantes atinjam conclusões corretas e, assim, se apropriem do conhecimento pretendido.

3.1.6 Os Modelos Mentais e Sua Estrutura

Já sabemos que um modelo mental consiste na representação interna de informações e essa representação é análoga, tal como "Aristóteles usa essa palavra no mesmo sentido de igualdade de relações...". (ABAGNANO, 2007, p. 66), nós a utilizamos também – ao estado de coisas que estiver representando. "Modelos mentais são análogos estruturais do mundo". (MOREIRA, 1996, p. 197).

Representações proposicionais possuem estrutura sintática, já os modelos mentais, em vez disso, possuem uma estrutura analógica à estrutura do estado de coisas que eles buscam representar. As representações proposicionais são verificáveis nas direções que sua sintaxe permite, já os modelos mentais são manipuláveis dentro da amplitude de possibilidades fornecidas por suas direções. Modelos mentais são mais específicos que representações proposicionais, eles são tão específicos quanto as imagens, estas últimas se referem a um objeto, e não a uma categoria de objetos (MOREIRA, 1996).

Entendemos então que as equações resultantes da representação matemática de uma teoria física funcionam, na mente das pessoas, através das representações proposicionais, pois ambas são como algoritmos. Já os modelos mentais carregam o fenômeno em si, quanto à estrutura, funcionamento e capacidade de previsão, mas suas estruturas têm limites, segundo Johnson-Laird

apud Moreira (1996), nos conceitos subjacentes aos significados das coisas cujo estado o modelo busca representar. Três princípios afetam consistentemente os conteúdos possíveis dos modelos mentais, sendo eles o da predicabilidade, o do inatismo e do número finito de primitivos conceituais. O primeiro permite identificar um conceito como natural, uma vez que ele não pode ser definido por predicados que não possuam algo em comum. O segundo determina que nossa capacidade de representar o mundo está baseada em primitivos conceituais que são inatos e subsidiam nossa percepção. E o terceiro determina a existência de um conjunto finito de primitivos conceituais que origina um conjunto de campos semânticos e que, por sua vez, origina um conjunto de operadores semânticos que tem sua utilidade na construção de conceitos complexos. Moreira destaca que "verbos associados à percepção visual como avistar, olhar, escrutinar e observar compartilham um núcleo subjacente que corresponde ao conceito de ver". (MOREIRA, 1996, p 203).

3.3 NOSSO MÉTODO

O que vimos até o presente momento, neste capítulo, remete às conquistas da Psicologia Cognitiva, a qual possui como principal hipótese e, em linhas gerais, segundo Lefrançois (2012), Pozo e Crespo (2009), Arruda, (2003), Quelhas (1999), Borges (1997) Moreira (1996), Capurro (1991), Johnson-Laird (1983) e muitos outros autores, que a mente funciona através de representações mentais e de procedimentos computacionais sobre essas representações. É a metáfora da mente como um computador.

Fazemos inferências e previsões manipulando nossos modelos mentais. Ou seja, rodamos simulações mentais como um computador roda um programa simples. Segundo de Kleer e Brown (1981):

Ao fazer previsões ou explicar o funcionamento de um sistema, a pessoa simula mentalmente uma estrutura simbólica de componentes interligados. Os tipos de componentes que formam o modelo e a maneira como eles estão conectados contribuem para o resultado. (apud Borges, 1997, p. 210).

Quando rodamos nossas simulações mentais, contabilizamos o nosso conhecimento específico sobre a situação que estamos tratando e nosso conhecimento geral sobre o mundo físico e seu funcionamento. Dessa forma, distinguimos um modelo mental de conhecimento em geral, no fato de ele poder ser

rodado em nossa imaginação para produzir descrições do estado de coisas, explicando o seu comportamento e produzindo previsões de eventos e estados futuros.

Em nossa análise, sob a sombra de nosso referencial teórico, entendemos que os modelos mentais são estruturalmente análogos aos sistemas, por eles representados e que eles podem ser construídos através da percepção, da imaginação ou de leitura.

De acordo com Arruda, (2003), Moreira (1996) e Quelhas (1999) a Teoria de Modelos Mentais de Johnson-Laird (1983) nos mostra que construímos modelos mentais de eventos e estados de coisas no mundo empregando processos mentais tácitos. Nossa habilidade em explicar algo está intimamente relacionada com nossa compreensão daquilo que desejamos explicar. E para compreender qualquer fenômeno ou estado de coisas do mundo, precisamos ter um modelo funcional dele que em princípio é próprio ao indivíduo e não representa um modelo científico. Cabe ao processo escolar buscar caminhos metodológicos que consigam ir aproximando os modelos mentais dos modelos científicos. Daí constatamos a enorme importância do parâmetro compreensão a fim de que se venha a construir um bom modelo mental acerca do conhecimento científico a ser estudado.

4 OBJETOS VIRTUAIS DE APRENDIZAGEM

As Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) estão cada vez mais presentes nas diversas atividades humanas. Esse fato tem transformado não só a forma como interagimos com o nosso entorno, mas também fez surgir o que chamamos de Sociedade do Conhecimento, pois o desenvolvimento econômico e social está vinculado ao capital humano e à sua capacidade de inovação cuja integração de novos conhecimentos está ligada ao processo de produção. Não obstante, muitos países em desenvolvimento precisam implementar as TIC nas escolas, pois elas estão diretamente ligadas à capacidade de criar conhecimento e de processar os já existentes. (VALDIVIA, 2008).

Paiva (2002, p. 7), chama a atenção para cobrança do mercado quanto à utilização dessas tecnologias: “Uma escola que não recorra, ou melhor, que não integre os novos meios informáticos, corre o risco de se tornar obsoleta”. A origem dessa cobrança remonta à origem dos modelos pedagógicos e, mais especificamente, ao surgimento da Escola Tecnicista, que, segundo Aranha (1996), surge por volta da metade do século XX, quando as esperanças oriundas da Escola Nova foram, de certa forma, frustradas. Assim o processo organizacional, típico das empresas de indústria e serviços, acaba por se estender à escola. Esse último autor, afirma ainda que:

Começa então a esboçar a tendência tecnicista, de influência norte-americana, cuja proposta consiste em: planejamento e organização racional da atividade pedagógica; operacionalização dos objetivos; parcelamento do trabalho, com a especialização das funções; incentivo a utilização de várias técnicas e instrumentos, como a instrução programada, ensino por computador, máquinas de ensinar, telensino, procurando tornar a aprendizagem “mais objetiva”. (ARANHA, 1996, p.183).

A implementação das TIC nas escolas tem ocorrido no dia a dia, no processo educativo e nas atividades cotidianas de todos, ainda de acordo com Valdivia:

Progressivamente, os países do mundo estão respondendo a esta demanda, desenvolvendo políticas para incorporar massivamente as TIC em suas escolas. Espera-se que esses esforços diminuam a brecha digital no interior desses países preparem os jovens para as novas competências vinculadas a essas tecnologias. Adicionalmente, as escolas esperam que as TIC ajudem a enfrentar a crescente exigência de assegurar uma educação de qualidade para todos os estudantes¹⁷. (VALDIVIA, 2008, p. 7).

¹⁷ Progressivamente los países del mundo están respondiendo a esta demanda, desarrollando políticas para incorporar masivamente las TIC en sus escuelas. Se espera que estos esfuerzos disminuyan la brecha digital al interior de los países y preparen a los jóvenes en las nuevas competencias vinculadas con estas tecnologías. Adicionalmente, las escuelas esperan que las TIC

Mas a questão não se resume à implementação das TIC nas escolas, pois, com elas, outros desafios surgiram. Valdivia afirma que mesmo com a implantação:

Tem sido difícil observar de forma consistente, os efeitos e impactos que se esperavam produzir nas realizações acadêmicas dos estudantes. Por isso, as políticas de TIC para escolas ao redor do mundo estão buscando maneiras de superar os obstáculos que impedem a integração das TIC ao currículo e limitam seu impacto na aprendizagem. Hoje em dia, existe um debate aberto entre acadêmicos e funcionários do governo a respeito das causas e implicações dessa falta de impacto. Alguns sugerem que o papel das TIC na aprendizagem sempre será mais limitado que o que se esperava; outros opinam que os efeitos serão vistos apenas quando os computadores forem tão disponíveis como são lápis e papel hoje; e também há os que alertam que nada acontecerá de fato com as TIC nas escolas, enquanto não houver um currículo e um sistema de avaliação que promovam de forma mais incisiva as novas competências para o século XXI¹⁸. (VALDIVIA, 2008, p. 7, tradução nossa).

Como um prólogo do afirmado acima por Valdivia (2008), Paiva (2002), em uma das conclusões de sua pesquisa, afirmou que não basta dispor e utilizar essas tecnologias, pois, como em quase tudo que se faz buscando educar, o *como* é mais importante do que o *que*. A técnica deve se sobrepôr à ferramenta e, dessa forma, justificou não apenas o seu estudo sobre as TIC, como também todos os outros que visam o estabelecimento de metodologias. Essa autora divulgou conclusões provenientes das respostas de 19.337 professores de uma amostra de 26.707 professores de 2.499 escolas em Portugal quanto ao uso das tecnologias de informação e comunicação na educação. Segundo Medeiros é "preciso assinalar-se que a simples utilização da Informática não garante que os estudantes tenham uma boa aprendizagem." (MEDEIROS e MEDEIROS 2002, p. 78). "Adicionalmente, existe o consenso de que a tecnologia é uma ferramenta educativa cujo impacto não

les ayuden a enfrentar la creciente exigencia de asegurar una educación de calidad para todos los estudiantes

¹⁸ Ha sido difícil observar en forma consistente los efectos e impactos que se esperaba producir en los logros académicos de los estudiantes. Por eso, las políticas de TIC para escuelas alrededor del mundo están buscando la manera de superar los obstáculos que impiden la integración de las TIC al currículum y limitan su impacto en los aprendizajes. Hoy en día existe un debate abierto entre académicos y funcionarios de gobierno respecto a las causas e implicancias de esta falta de impacto. Algunos sugieren que el rol de las TIC en el aprendizaje será siempre más acotado de lo que se piensa; otros opinan que los efectos se verán sólo cuando los computadores sean tan disponibles como lo son hoy en día el papel y lápiz; y también hay quienes alertan que nada sucederá realmente con las TIC en las escuelas mientras no se tenga un currículum y un sistema de evaluación que promuevan de forma más decidida las nuevas competencias para el siglo XXI. (VALDIVIA, 2008, p. 7).

depende simplesmente de ter acesso a ela, e sim de como ela é usada pelos estudantes¹⁹. (VALDIVIA, 2008, p. 25, tradução nossa).

No levantamento feito por Paiva (2002), encontramos que, do total de professores participantes, “62% reconhecem que as TIC tornam as aulas mais motivadoras para os alunos”, (PAIVA, 2002, p. 21), o que demanda especial atenção, uma vez que indica uma percepção, baseada na observação diária, dos professores. Portanto, pode-se dizer que é uma tendência que nos últimos dez anos vem se acentuando cada vez mais. Ainda temos Valdivia (2008), ao tratar de nossas expectativas quanto as TIC, "Espera-se que as TIC ajudem a modernizar os processos de ensino e aprendizagem e tornem a escola mais atrativa para as novas gerações que vivem em um mundo crescentemente digital e multimídia²⁰". (VALDIVIA, 2008, p. 7, tradução nossa). Quanto a isso, Cachapuz (2005) afirma que:

A utilização das novas tecnologias no ensino está plenamente justificada se tivermos em conta que um dos objetivos básicos da educação é “preparar os adolescentes para serem cidadãos de uma sociedade plural, democrática, e tecnologicamente avançada”. Assim, por exemplo, as atuais orientações curriculares do ensino espanhol contemplam a incorporação das “Novas Tecnologias da Informação como conteúdo curricular e também como meio didático”. (MEC, 1989, apud CACHAPUZ, 2005, p. 204).

É nesse cenário da educação mundial que elaboraremos animações, simulações e modelagens computacionais com as quais pretendemos facilitar a compreensão da física envolvida na concepção da Gravitação Universal de Newton, mas antes de descreveremos com mais detalhes o uso das TIC, definiremos o que são Objetos de Aprendizagem e trataremos das já conhecidas vantagens em utilizar as simulações computacionais como ferramenta didática.

4.1 UTILIZAÇÃO DAS TIC

Da amostra de professores analisada por Paiva (2002) tem-se: “A maioria usa o computador para preparar aulas (81%), 94% destes usam-no para preparar

¹⁹ Adicionalmente, existe consenso en que la tecnología es una herramienta educativa cuyo impacto no depende simplemente de tener acceso a ella, sino de cómo es usada por los estudiantes. (VALDIVIA, 2008, p. 25).

²⁰ Se espera que las TIC ayuden a modernizar los procesos de enseñanza y aprendizaje y hagan más atractiva la escuela para las nuevas generaciones que viven en un mundo crecientemente digital y multimedia. (VALDIVIA, 2008, p. 7).

fichas/testes, 54% para pesquisar na *Internet* sobre a sua disciplina e, 20% para fazer apresentações". (PAIVA, 2002, p. 21).

A origem das TIC nas salas de aula remonta às mais diversas fontes e, como uma delas, temos Thomas Edison (1922), referindo-se às animações cinematográficas, "as figuras em movimento estão destinadas a revolucionar o nosso sistema educacional. Em poucos anos, elas suplantarão amplamente senão inteiramente, o uso dos livros didáticos" (EDISON, 1922 apud MEDEIROS e MEDEIROS 2002, p. 77). Sabemos que isso não ocorre, mas passos largos são dados nessa direção, uma vez que dispomos de instrumentos como os tablets, que possibilitam a utilização das TICs em qualquer lugar e tempo. Apesar de apenas 20% dos professores utilizarem apresentações (por exemplo, as produzidas no PowerPoint, indo desde uma estrutura de tópicos até modelos digitais básicos de simulação computacional), vemos pelos dados abaixo que 62% dos professores reconhecem que as TICs tornam as aulas mais motivadoras para os alunos.

Atitude dos professores face ao uso das TIC em contexto educativo: Cerca de metade (51%) diz ter recebido formação em TIC e conhece as suas potencialidades, mas por outro lado 68% consideram que estas lhes exigem novas competências na sala de aula. 62% reconhecem que as TIC tornam as aulas mais motivadoras para os alunos. As opiniões dividem-se no que respeita ao fato de não conhecerem a fundo as vantagens pedagógicas do uso das TIC nas suas aulas: 40% dizem não conhecer e 38% dizem conhecer. Mas mais da metade (55%) diz estar motivado para usar as TIC com os alunos. (PAIVA, 2002, p. 21).

Segundo quanto à aplicação da informática no contexto escolar e para o ensino de Física:

A informática tem uma aplicação muito diversificada no ensino da Física, sendo utilizada em medições, gráficos, avaliações, apresentações, modelagens, animações e simulações. (MEDEIROS e MEDEIROS, 2002, p. 78).

Um dado mais preciso, referindo-se especificamente ao uso da plataforma PowerPoint, é que "a utilização de programas de apresentação como o *Power Point* é escassa (16%)" (PAIVA, 2002, p. 21). Acreditamos que a razão de tal fato esteja centrada, ainda, na falta de técnica e no desconhecimento das potencialidades de uma simulação computacional e até mesmo de simples animações por computador aplicadas ao ensino de disciplinas como a física, e das possibilidades como a de exibir o fenómeno de forma semelhante ao modo como ele é percebido pela mente, pois:

A possibilidade de fazer simulações inteligentes no computador, permite-nos ter modelos de 'processamento de informação', baseados na metáfora

da mente humana como computador. Esta orientação teórica traz-nos vantagens de indiscutível interesse. (CASTRO e CARVALHO, 2006, p. 205).

Ainda segundo Paiva (2002), os professores, quase em sua totalidade, exibem interesse em capacitação no uso das TIC, pois acreditam que elas facilitam a prática letiva, como vemos abaixo:

94% dos professores da amostra gostariam de saber mais sobre o uso das TIC em contexto educativo; 78% acham que as TIC os ajudam na sua prática letiva; 68% dos professores sentem que o uso das TIC lhes exige novas competências e, muitos deles, revelam conhecer mal as vantagens das TIC em contexto educativo. (PAIVA, 2002, p. 46).

E esse interesse nos leva à percepção de que não só existe uma tendência de utilização das TIC, como mostra que essa tendência está cada vez mais próxima de um movimento que pode culminar na substituição do quadro (antes negro, agora branco; antes à giz e agora à piloto) por um quadro digital, um grande monitor ou projetor no qual os modelos estáticos de representação da natureza, hoje desenhados a critério dos dons artísticos do professor, serão substituídos por modelos digitais que não só representarão a natureza, como também possibilitarão uma melhor interação entre os estudantes e os professores em favor da construção do conhecimento.

4.2 COMPUTADORES COMO MÁQUINAS DE ENSINAR

A utilização do computador como ferramenta de ensino tem, talvez, seu início efetivo com o trabalho de Burrhus Frederic Skinner (1995) quando – partindo da análise de um experimento no qual um rato faminto foi trancado em uma caixa na qual ele podia baixar uma alavanca e, com esse ato, imediatamente obter alimento – formulou princípios reguladores das interações entre um organismo e o seu meio ambiente, em termos de estímulo-resposta, separando e classificando essas respostas em duas categorias as “eliciadas por estímulos conhecidos, são classificadas como *respondentes* [...] respostas que não precisam ser correlacionadas com nenhum estímulo conhecido são designadas como *operantes*”. (HILGARD, 1975, p. 102, grifo do autor).

De acordo com Skinner (1995), após o rato fornecer uma resposta baixando a alavanca, pode-se colocar o comportamento do rato sob o controle de uma

variedade de condições de estímulos. Qualquer um pode funcionar como um reforço, desde que ele aumente a probabilidade de uma resposta. Segundo Hilgard:

Os estímulos podem constituir reforçadores de dois tipos, o positivo que ao ser acrescentado a uma situação aumenta a probabilidade de uma resposta operante e o *reforçador negativo* que se removido de uma situação fortalece a probabilidade de uma resposta operante. (HILGARD, 1975, p. 110, grifo do autor).

Para Skinner (1995), o comportamento pode ser gradualmente modificado ou modelado até que apareçam outras respostas que não faziam parte do repertório comportamental do rato. Sua caixa ficou conhecida como Caixa de Skinner e seu êxito o levou a generalizar o modelo de aprendizagem assim obtido, mas para esse experimento ser válido ele especificou três prioridades em sua metodologia:

1 - a ocasião na qual ocorreu a resposta;
 2 - a própria resposta;
 3 - as consequências reforçadoras.
 As relações entre elas constituem as 'contingências de reforço'.
 (SKINNER, 1975, p. 12).

Skinner, aplicando suas descobertas à educação afirmou que “A topografia do comportamento de um aluno é a mais clara evidência de que ele sabe alguma coisa, e tem sido sempre superenfaticada”. (Skinner, 1995, p. 17). Revelou, assim, que seu comportamento possui um repertório básico e que se o professor usar técnicas adequadas ao ensinar, o aluno terá maiores chances de aprender. Como exemplo, esse teórico traz os professores chineses e gregos ao afirmar que:

Na educação clássica grega e chinesa, ensinavam-se os meninos a recitar trechos de grandes obras literárias e, quando eles o conseguiam, não se duvidava da eficiência do professor. Atualmente, não mais exigimos muita recitação literal, mas a nossa preocupação pela resposta é do mesmo tipo, já que o professor é reforçado, quando o aluno responde corretamente, tentará lançar mão de técnicas que o induzem a fazê-lo, mas a probabilidade que o aluno responda de forma similar no futuro (vai usar o que sabe) é negligenciada. (SKINNER, 1975, p. 17).

O que Skinner propôs foi um ensino baseado em um processo de contingências de reforço, como sugerido abaixo:

Ensino é o arranjo das contingências de reforço que acelera a aprendizagem. Um aluno aprende sem que lhe ensinem, mas aprenderá mais eficientemente sob condições favoráveis. Os professores sempre dispuseram contingências eficazes toda vez que ensinaram com sucesso, mas estarão mais propensos a fazê-lo se entenderem o que estão fazendo. (SKINNER, 1975, p. 17, grifo do autor).

Skinner (1975) observou que, nas escolas, o comportamento dos alunos pode ser modelado pela apresentação de materiais em cuidadosa sequência e pelo

oferecimento das recompensas ou reforços apropriados, pois, para esse autor, é comum ao homem e aos ratos um mundo no qual prevalecem determinadas contingências de reforços²¹. De acordo com essa teoria, deve-se dividir o material em passos muito pequenos e os reforços devem ser contingentes a cada passo da conclusão satisfatória, pois os reforços ocorrem frequentemente quando cada passo sucessivo no esquema for o menor possível, “Skinner prefere tornar as exigências da aprendizagem tão graduais que o aluno raramente ou nunca comete erros”. (HILL, 1981, p. 84). Para Skinner (1975), os aparelhos mecânicos e elétricos (Máquinas de Ensinar²²) devem ser usados para maior aquisição. Pois as contingências de reforço mais eficiente para controlar o estudante, provavelmente estão além das capacidades de um professor, a exemplo disso temos:

Uma forma do processo apresenta uma combinação de números para o ensino de adição. A criança assinala a resposta correta numa espécie de teclado de máquina de somar; se a resposta for correta, o “reforço ocorre quando o problema é seguido por outro. (HILGARD, 1975, p. 131).

Segundo Skinner (1975), as principais características deste método, denominado Instrução Programada, consistem em a matéria estudada ser apresentada em pequenas partes e estas serem seguidas de um exercício cujo acerto ou erro seja imediatamente verificado. As vantagens na utilização das máquinas de ensinar, para esse autor, estão em:

A medida do tempo do reforço é rápida, incorporando assim nosso conhecimento dos arranjos favoráveis ao reforço; e a ordem de problemas é determinada por uma compreensão exata de generalização, interferência, e a necessidade de revisão com intervalo. (HILGARD, 1975, p. 131).

A reconstrução teórica que, resumidamente, acabamos de fazer remete a uma teoria que se saiu bem, pois foi bastante pesquisada, representa bem os fatos tratados na mesma e possui adequada verificabilidade, pressupostos necessários a uma boa teoria científica. Porém, muitos críticos alegam que ela não explica os processos simbólicos de tomada de decisão, de resolução de problemas ou mesmo de percepção, além de negligenciar o papel da biologia na aprendizagem (LEFRANÇOIS, 2012). Mas esses problemas, nós evitamos quando utilizamos como referencial teórico a teoria dos Modelos Mentais. Naturalmente, poderíamos ter

²¹ Esta concepção behaviorista (baseada meramente em comportamentos) e que iguala homens a ratos tem sido duramente criticada na literatura.

²² Não obstante existam reforços, reduzir a aprendizagem e o ensino apenas a esses expedientes constitui-se em reducionismo altamente criticável e deformador. A criatividade, certamente, não poderia ser explicada com o auxílio apenas da categoria de 'reforço'. De fato, crianças não são ratos. Talvez a abordagem behaviorista nem mesmo explique as atitudes dos ratos.

usado a Teoria Sócio-interacionista de Vygotsky (1995) ou a Epistemologia Genética de Piaget (1995) ou ainda a Aprendizagem Significativa de Ausubel (1982), mas esperamos ter ficado clara a razão de nossa escolha no capítulo anterior. Por que, então, trouxemos à baila Skinner? O fizemos para mostrar que as máquinas de ensinar, de certo modo, evoluíram e continuam úteis, não no sentido skinneriano, mas ao modo levyniano, que, ao tratar do potencial de utilização dos computadores na educação em relação às imagens, afirma que:

A infografia, que reúne todas as técnicas de tratamento e de criação de imagens, representa certamente algo a mais que uma automatização da pintura ou do desenho. Como a luneta astronômica, o microscópio ou os raios X, a interface digital alarga o campo do visível. Ela permite ver modelos abstratos de fenômenos físicos ou outros. (LÉVY, 2011, p. 107, grifo do autor).

E ainda as imagens e movimentos combinados sistematicamente aos sons e transmitidas pela rede mundial de computadores com fins educacionais, para Levy demanda muitas possibilidades ao aprendizado, como vemos abaixo:

A imagem e o som podem tornar-se os pontos de apoio de novas tecnologias intelectuais. Uma vez digitalizado, a imagem animada, por exemplo, pode ser decomposta, recomposta, indexada, ordenada, comentada, associada no interior de hiperdocumentos multimídias. Programas disponíveis na rede poderão funcionar como verdadeiros kits de simulação, catálogos de mundos que poderão ser explorados empiricamente, através de imagens e sons sintetizados. (LÉVY, 2011, p. 104).

Mas não estamos defendendo aqui a concretização do temor de Lucia, personagem de um conto do francês Michel Tournier. Segundo Tournier (1994), Lucia é professora de um vilarejo e carrega traumas desde a infância e episódios confusos em seu trabalho. Ela sente que a sala de aula vai se convertendo em um monstro que por fim se dirige a ela como dito abaixo (DUSSEL; CARUSO, 2003):

A culminação normal do ensino moderno é o computador, disse-me, o professor-robô desprovido de qualquer sinal de afetividade, e por isso infinitamente paciente e objetivo, que leva em conta todas as particularidades do aluno único colocado diante dele, suas falhas e suas aptidões, destilando a um ritmo apropriado a informação do programa. Ele trabalhava para atingir tal ideal. (TOURNIER, 1994, p. 136 apud DUSSEL; CARUSO, 2003, p. 236).

O que estamos defendendo é a eficiência na utilização de simulações computacionais, de modelagem computacional ou simplesmente de animações gráficas como ferramentas didáticas e através do computador. Buscamos nos aproximar o máximo possível de ferramentas que favoreçam a construção do conhecimento. No nosso caso, de conhecimentos específicos, pois tratamos do caso

da unificação da Física de Galileu com a Astronomia de Kepler na concepção da Gravitação Universal, mas sem nos esquecermos da observação de Perraton: “Não basta achar que algo é bom: é preciso teorizar, passar à prática e, mais ainda, é necessário medir, avaliar. Só avaliando podemos selecionar as melhores ferramentas e metodologias e promover o progresso.” (apud PAIVA, 2002, p. 7). E, como dito por Barbosa e Penteado (2001):

Para que o professor em todos os níveis aprenda a conviver com as incertezas trazidas pela mídia que tem características quantitativas e qualitativas novas em relação à memória, um amplo trabalho de reflexão coletiva tem que ser desenvolvido. (apud PRATA e NASCIMENTO, 2007, p. 8).

4.3 OBJETOS VIRTUAIS DE APRENDIZAGEM

A evolução das TIC possibilitou novas situações de aprendizagem. Basta um computador ligado à internet para obtermos uma inimaginável quantidade de informações. E, partindo desse ponto, possibilitarmos a aprendizagem. Nossa proposta envolve a utilização dos computadores no favorecimento da criação de situações de aprendizagem e, para isso, precisamos transferir para o estudante a tarefa de idealizar e produzir seus saberes construindo o que chamaremos de Objetos Virtuais de Aprendizagem (OVA) ou, de forma geral, Objetos de Aprendizagem (OA), como dito por David A. Wiley, membro do Digital Learning Environments Research Group da Utah State University:

Uma instrutiva tecnologia chamada de “objetos de aprendizagem” atualmente leva vantagem sobre outros candidatos ao cargo de tecnologia de escolha para a próxima geração de design instrucional, desenvolvimento e entrega, devido ao seu potencial de reutilização, generatividade, adaptabilidade e escalabilidade²³. (WILEY, 2000, p. 2, tradução nossa).

Pescando em águas rasas, nós podemos definir os OVA como recurso digital reutilizável e facilitador da aprendizagem de conceitos e teorias, mas que também estimula o desenvolvimento das habilidades cognitivas do estudante. A exemplo disso temos Lom (2000), ao afirmar que “Objetos de Aprendizagem são definidos aqui como qualquer entidade, digital ou não digital, que pode ser usada, reutilizada

²³ An instructional technology called “learning objects” (LTSC, 2000a) currently leads other candidates for the position of technology of choice in the next generation of instructional design, development, and delivery, due to its potential for reusability, generativity, adaptability, and scalability (WILEY, 2000, p. 2).

ou recorrida durante o aprendizado baseado na tecnologia²⁴. (apud WIEY, 2000, p. 4, tradução nossa).

Grande tem sido o apoio a produção e ao estudo dos OA, e a maioria com sua nomenclatura própria, a exemplo temos:

O previamente mencionado projeto ARIADNE usa o termo “documentos pedagógicos” (ARIADNE, 2000). O projeto NSF-funded Educational Software Components of Tomorrow (ESCOT) usa o termo “componentes de software educacional” (ESCOT, 2000), enquanto o projeto Multimedia Educational Resource for Learning and On-Line Teaching (MERLOT) se denominam como “materiais de aprendizagem online” (MERLOT, 2000). Por fim, O Apple Learning Interchange simplesmente se denominam como “recursos”²⁵ (ALI, 2000). (WIEY, 2000, p. 4, tradução nossa).

Um dos principais objetivos ao utilizar um OVA é a interação que leva à metacognição, algo de extrema importância como colocou Bruner (2001):

A pedagogia moderna esta partindo cada vez mais em direção à visão de que a criança deveria estar ciente de seus próprios processos de pensamento e que essencial, tanto para o teórico da pedagogia quanto para o professor, ajudá-la a tornar-se mais metacognitiva e estar tão ciente de como realiza sua aprendizagem e pensamento quando da matéria que esta estudando. (BRUNER, 2001, P. 68).

A afirmação de Bruner (2001) acerca da pedagogia moderna sobre ajudar os estudantes a tornarem-se cada vez mais metacognitivos²⁶ reflete nos OVA quanto a sua essência a qual busca-se, por vezes, retratar através da metáfora do Lego. Essa metáfora tem por finalidade fazer os iniciantes nessa área entenderem como se procura construir os OA. “Crie pequenas peças de conhecimento (LEGOs) que podem ser montadas (organizadas juntas) em uma estrutura instrucional maior (castelo) e reutilizada em outras estruturas instrucionais²⁷”. Considere as seguintes características desse brinquedo: todo bloco de LEGO é combinável com outro bloco, eles podem ser montados da maneira que quisermos e são simples o suficiente para um estudante, podendo ser adulto ou até mesmo uma criança, conseguir combiná-los. Mas Wiley (2000) defende que essa não é uma boa metáfora, pois a

²⁴ Learning Objects are defined here as any entity, digital or non-digital, which can be used, re-used or referenced during technology supported learning. (LOM apud WIEY, 2000, p. 4).

²⁵ The previously mentioned ARIADNE²⁵ project uses the term “pedagogical documents” (ARIADNE, 2000). The NSF-funded Educational Software Components of Tomorrow (ESCOT) project uses the term “educational software components” (ESCOT, 2000), while the Multimedia Educational Resource for Learning and On-Line Teaching (MERLOT) project refers to them as “online learning materials” (MERLOT, 2000). Finally, the Apple Learning Interchange simply refers to them as “resources” (ALI, 2000).

²⁶ A metacognição poderia ser concebida neste contexto como a consciência da aprendizagem do sujeito que aprende acerca de seus próprios processos de aprendizagem.

²⁷ Create small pieces of instruction (LEGOs) that can be assembled (stacked together) into some larger instructional structure (castle) and reused in other instructional structures.

combinação poderá resultar em objetos não úteis instrucionalmente e assim propõe a metáfora do OA como um átomo, dando a seguinte descrição de suas características:

Um átomo é uma “coisa” pequena que combinada e recombinada com outros átomos forma “coisas” maiores. Isso parece inferir o significado mais amplo da metáfora do LEGO. Entretanto, a metáfora do átomo difere da metáfora do LEGO de duas formas significantes:
 Nem todo átomo é combinável com outro átomo;
 Átomos só podem se combinar em certas estruturas determinadas por sua própria estrutura interna;
 É necessário certo conhecimento para combinar os átomos²⁸. (WILEY, 2000, p. 17, tradução nossa).

Tornando, dentro dessa nova ideia, menos provável a elaboração de OA inúteis instrucionalmente.

Podemos citar quatro propriedades que devem ser observadas em um AO, sendo elas: a flexibilidade, a facilidade para atualização, a customização e a interoperabilidade. Na primeira, os OA são criados para serem simples e flexíveis sendo, portanto, reutilizáveis sem custos adicionais e manutenção; na segunda, temos a facilidade para atualizá-los e utilizá-los, ao mesmo tempo em que outros usuários; na terceira, temos a facilidade de utilizar no contexto que nos convier e ao mesmo tempo em que outros os fazem em contextos distintos; e, por último, podem ser utilizados em diversas plataformas de ensino/aprendizagem. (PRATA e NASCIMENTO, 2007). Wiley (2000) cita outra propriedade que é a “Granularidade. Discussão do problema de combinar objetos de aprendizagem em termos de sequenciamento²⁹”. (WILEY, 2000, p. 12, tradução nossa). E, por isso, surge a dúvida quanto ao tamanho máximo que um OA deve possuir.

Mas a granularidade não é o único problema digno de preocupação dos OA. Existe um, consideravelmente maior, também apresentado por Wiley (2000) que é o fato dos fornecedores produzirem OAs relacionados a uma teoria instrucional neutra. Ou, em uma descrição mais precisa, possuindo como pano de fundo uma teoria instrucional agnóstica, que podemos interpretar, segundo nosso autor, como a

²⁸ An atom is a small "thing" that can be combined and recombined with other atoms to form larger "things." This seems to capture the major meaning conveyed by the LEGO metaphor. However, the atom metaphor departs from the LEGO metaphor in some extremely significant ways:
 Not every atom is combinable with every other atom.
 Atoms can only be assembled in certain structures prescribed by their own internal structure.
 Some training is required in order to assemble atoms. (WILEY, 2000, p. 17).

²⁹ *Granularity*. Discussion of the problem of combining learning objects in terms of sequencing. (Wiley, 2000, p. 12).

possibilidade de esses fornecedores não estarem utilizando uma teoria instrucional subjacente à elaboração dos OA e, portanto, fornecendo produtos inúteis instrucionalmente. Essa última preocupação relatada por Wiley (2000), foi eliminada de nosso trabalho quando não só adotamos uma teoria da aprendizagem, como ainda a escolhemos norteados pela metáfora da mente como um computador, pois não defendemos aqui a proposta de Skinner (1975, p. 17) na qual um programa é um conjunto de contingências que modelam a topografia da resposta e põem o comportamento sobre o controle de estímulos de maneira diligente. Apesar de concordarmos com o mesmo quando afirma que:

Os professores têm tradicionalmente usado apenas as medidas ambientais mais conspícuas. A vergasta e o açoite marcam uma longa história de controle aversivo, que ainda não chegou ao fim. A maioria dos estudantes ainda estuda, recita e presta exames principalmente para evitar as consequências do não fazê-lo. As consequências podem ter sido moderadas, mas são, entretanto suficientemente aversivas para ter efeitos colaterais perturbadores. (SKINNER, 1975, p. 17).

O que a teoria dos Modelos Mentais de Johnson-Laird (1983) tornou possível foi a escolha de OVAs que, enquanto simulação, assemelham-se aos processos mentais. Em que pesem as analogias e a metáforas com o computador se justificarem até um certo ponto, haveremos de convir que os processos mentais não são evidentemente idênticos aos processos computacionais. O próprio insight abduativo de Peirce enquanto característica singular humana constitui-se em uma das diferenças importantes entre o ser humano e o computador.

4.4 ANIMAÇÕES E SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Como afirmamos em (SANTOS e FILHO, 2014) o ato de ensinar é e sempre será um desafio infinitamente recorrente para todos que a ele se propõem, principalmente no que concerne aos teores e controvérsias ensejadas na busca de um ensino de excelência, e, não obstante, às ferramentas que devem ser utilizadas para a melhor consecução deste importante mister. Além do fato de que:

Adentrar a sala de aula tendo pleno domínio do conteúdo a ser ensinado, embora seja um elemento de imprescindível valor para um bom ensino, não se constitui, por si só, em algo suficiente para o cumprimento a pleno título dessa missão, pois ainda resta a necessária atitude que consiste em prover meios para facilitar o debate crítico, bem como os procedimentos, inclusive os de natureza mais técnica, para fazê-lo de forma eficiente. (SANTOS e FILHO, 2014, p. 1)

Segundo Pierre Lévy, “a escola é uma instituição que há cinco mil anos se baseia no falar/ditar do mestre. Uma verdadeira integração da informática (como do audiovisual) supõe, portanto o abandono de um hábito antropológico mais que milenar” (LÉVY, 2011, p. 8). Sabemos que essa integração, como supracitado, tem acontecido progressivamente também através da utilização, cada vez mais frequente, de simulações computacionais. Na disciplina Física, o quadro negro e a pura imaginação têm dado lugar às animações gráficas por computador e, em muitos casos, verdadeiros laboratórios virtuais de simulação e modelagem computacional (SANTOS JÚNIOR e BASTOS FILHO, 2014). Uma simulação computacional é:

Uma técnica poderosa que ensina sobre aspectos do mundo ao imitá-lo ou replicá-lo. Estudantes não são apenas motivados pelas simulações, mas aprendem por interagir com elas da mesma maneira que reagiriam em situações reais. Em quase todas as instâncias, a simulação também simplifica a realidade ao omitir ou modificar detalhes. Nesse mundo simplificado, os estudantes resolvem os problemas, aprendem procedimentos, chegam ao entendimento de características de fenômenos e como controlá-los ou aprendem que atitudes tomar em diferentes situações³⁰. (ALASSI e TROLLIP apud SAHIN, 2006, p 134, tradução nossa).

O virtual permeia nossas vidas, pois somos residentes em um mundo globalizado onde o tempo e o espaço, tal como antes os percebíamos, têm suas regras constantemente violadas pela internet, com seus bancos de dados e suas simulações do mundo, da natureza e até da própria vida. A essência do virtual passou a ter presença constante em nosso cotidiano, quando nos referimos a sites de relacionamentos, à dramaturgia dos filmes, às simulações de cunho científico ou financeiro e à educação. Vivemos em um mundo onde existimos e podemos existir em vários lugares e ao mesmo tempo e, para isso, só precisamos realizar uma vídeo conferência e pronto: estaremos aqui e lá. Mas o que é o virtual? Em ótica geométrica, é uma imagem formada em um lugar no qual a luz refletida pelo objeto não chega, porém o vemos (SANTOS JÚNIOR e BASTOS FILHO, 2014). No

³⁰ A powerful technique that teaches about some aspect of the world by imitating or replicating it. Students are not only motivated by simulations, but learn by interacting with them in a manner similar to the way they would react in real situations. In almost every instance, a simulation also simplifies reality by omitting or changing details. In this simplified world, the student solves problems, learns procedures, comes to understand the characteristics of phenomena and how to control them, or learns what actions to take in different situations. (ALASSI e TROLLIP apud SAHIN, 2006, p 134).

entanto, o termo transcendeu esse significado há muito e em uma tentativa de compreendê-lo, estabelecendo um novo alcance para ele, é que se torna pertinente, para os nossos propósitos, trazer à baila o seguinte excerto de Pierre Levy:

A palavra virtual vem do latim medieval *virtualis*, derivado por sua vez de *virtus*, força, potência. Na filosofia escolástica, é virtual o que existe em potência e não em ato. O virtual tende a atualizar-se, sem ter passado no entanto à concretização efetiva ou formal. A árvore está virtualmente presente na semente. Em termos rigorosamente filosóficos, o virtual não se opõe ao real, mas ao atual: virtualidade e atualidade são apenas duas maneiras de ser diferentes. (LÉVY, 2011, p. 15 grifo do autor).

É no sentido de potência que as simulações computacionais de física formam laboratórios virtuais, pois nessas simulações está virtualmente presente o conhecimento abordado. O fenômeno pode ser reproduzido e ter seus valores alterados dentro de uma gama de possibilidades e, dessa forma, pode-se assistir ao mesmo e assim estudá-lo sem correr riscos, sem custos e sem tempo adicional. (SANTOS JÚNIOR e BASTOS FILHO, 2014)

De acordo com Gaddis (2000), as simulações computacionais envolvem diversas tecnologias que vão do vídeo à realidade virtual e, ainda, podem ser classificadas de acordo com o grau de interatividade entre elas e quem as usa. Entendemos por interatividade o fato de um programa ser capaz de fornecer, como saída de dados *output*, uma animação de um determinado fenômeno tratado ou uma grande quantidade de animações alternativas relativas ao *input* de valores fornecidos pelo estudante. Mas, como a própria denominação esclarece, as simulações são de um determinado fenômeno e por essa razão são baseadas em um modelo matemático que deve ser processado como dito abaixo:

Evidentemente, qualquer simulação está baseada em um modelo de uma situação real, modelo este matematizado e processado pelo computador a fim de fornecer animações de uma realidade virtual. A construção, portanto, de uma simulação computacional pressupõe, necessariamente, a existência de um modelo que lhe dá suporte e que lhe confere significado. As simulações podem ser vistas como representações ou modelagens de objetos específicos reais ou imaginados, de sistemas ou fenômenos. (MEDEIROS e MEDEIROS, 2002, p. 78).

Barbara Gaddis (2000), em sua dissertação de doutorado, na Universidade de Colorado, elencou as principais justificativas apontadas para utilização das simulações no ensino das ciências, sendo estas:

Reduzir o 'ruído' cognitivo de modo que os estudantes possam concentrar-se nos conceitos envolvidos nos experimentos; fornecer um feedback para aperfeiçoar a compreensão dos conceitos; permitir aos estudantes

coletarem uma grande quantidade de dados rapidamente; permitir aos estudantes gerarem e testarem hipóteses; engajar os estudantes em tarefas com alto nível de interatividade; envolver os estudantes em atividades que explicitem a natureza da pesquisa científica; apresentar uma versão simplificada da realidade pela destilação de conceitos abstratos em seus mais importantes elementos; tornar conceitos abstratos mais concretos; reduzir a ambiguidade e ajudar a identificar relacionamentos de causas e efeitos em sistemas complexos; servir como uma preparação inicial para ajudar na compreensão do papel de um laboratório; desenvolver habilidades de resolução de problemas; promover habilidades do raciocínio crítico; fomentar uma compreensão mais profunda dos fenômenos físicos, auxiliar os estudantes a aprenderem sobre o mundo natural, vendo e interagindo com os modelos científicos subjacentes que não poderiam ser inferidos através da observação direta; acentuar a formação dos conceitos e promover a mudança conceitual. (GADDIS, apud MEDEIROS e MEDEIROS, 2002, p. 78).

Sobre as simulações apresentarem uma versão simplificada da realidade, temos que “as simplificações permitem que os aprendizes foquem nas informações ou habilidades mais importantes, o que torna o aprendizado mais fácil. Essa perspectiva de usar simulações é muito apropriada para realizar testes comportamentais e cognitivos simplificados³¹”. (GRABE e GRABE apud SAHIN, 2006, p. 134, tradução nossa). Temos ainda Sahin (2006) coadunando-se com Gaddis (2000) ao afirmar que:

Simulações de computador dão aos estudantes a oportunidade de observar uma experiência de mundo real e interagir com ela. Simulações de computador são potencialmente úteis para testes de laboratório que são impraticáveis, caras, impossíveis ou perigosas de realizar. Simulações podem contribuir para mudanças conceituais, promover experiências abertas e fornecer ferramentas para a pesquisa científica e resolução de problemas. Simulações de computador também tem potencial para auxiliar na educação à distância³². (SAHIN, 2006, p 141, tradução nossa).

Entre as vantagens elencadas, algumas nos são de especial interesse sendo elas: reduzir o ruído cognitivo, pois com as simulações estaremos virtualmente exibindo o fenômeno; apresentar uma versão simplificada da realidade, pois poderemos eliminar, sem prejuízo da verdade científica, grandezas que tornam a situação tratada não ideal; tornar conceitos abstratos mais concretos, pois estaremos exibindo, no lugar de apenas descrevermos verbalmente, o fenômeno em

³¹ Simplification allows learners focus on critical information or skills and make learning easier. This perspective for the use of simulations is very appropriate for accomplishing simplified behavioral and cognitive tasks. (GRABE e GRABE apud SAHIN, 2006, p. 134).

³² Computer simulations give students the opportunity to observe a real world experience and interact with it. Computer simulations are potentially useful for simulating labs that are impractical, expensive, impossible, or too dangerous to run. Simulations can contribute to conceptual change, provide open-ended experiences, and provide tools for scientific inquiry and problem solving. Computer simulations also have potentials for distance education. (SAHIN, 2006, p 141).

causa; promover habilidades do raciocínio crítico, uma vez que estamos também fomentando uma compreensão mais profunda dos fenômenos físicos; e acentuar a formação dos conceitos. Mas entendemos também o que Alexandre Medeiros coloca como preocupação ao afirmar que é "primordial notar-se que um sistema real é frequentemente muito complexo e as simulações que o descrevem são sempre baseadas em modelos que contêm, necessariamente, simplificações e aproximações da realidade". (MEDEIROS, 2002. p. 80). Mas buscamos remediar esse problema apresentando não uma simulação, mas uma sequência de animações e modelagens computacionais que possuem, em primeira e última instância, simulações dos fenômenos objetivados.

Ao utilizarmos simulações computacionais tentamos colaborar para a elaboração, pelo estudante, de adequados modelos mentais, pois as simulações permitem a implementação recursiva do modelo mental, como vemos:

A partir do software de simulação, o sujeito pode rodar seu modelo e avaliá-lo online, o modificando a partir dos ajustes que julgue ser necessários, realizando novas previsões e voltando a rodá-lo até obter um resultado satisfatório. A execução recursiva é uma propriedade essencial dos modelos mentais e está associada ao requisito de funcionalidade dos mesmos. É possível que o software de simulação facilite que o sistema cognitivo do sujeito realize o contraste e a revisão recursiva do modelo, à medida que mostra a situação e alivia a carga da memória necessária para checar as previsões do modelo ou defender, simultaneamente, mais de um modelo³³. (SANTOS, OTERO e FANARO, 2000, p. 53, tradução nossa).

No início do Capítulo 3, demonstramos a coadunação entre a Teoria dos Modelos Mentais de Johnson-Laird (2005) e Charles Sanders Peirce (1974). Nesse momento, torna-se conveniente demonstrar semelhante relação entre as simulações computacionais e os modelos mentais, revelando o entrelaçamento teórico que objetivamos, inicialmente, em nosso trabalho. Para tanto, traremos à baila Moreira ao afirmar que:

Possíveis metodologias para investigar modelos mentais estão baseadas na premissa de que as representações mentais das pessoas podem ser inferidas (modeladas) a partir de seus comportamentos e verbalizações.

³³ A partir del software de simulación, el sujeto puede rodar su modelo y evaluarlo on line, modificándolo a partir de los desajustes que detecte, realizando nuevas predicciones y volviendo a rodar el modelo hasta que este le resulte satisfactorio. La ejecución recursiva es una propiedad esencial de los modelos mentales y está asociada al requisito de funcionalidad de los mismos. Es posible que el software de simulación facilite al sistema cognitivo del sujeto esta tarea de contrastación y revisión recursiva del modelo en la medida que muestra la situación y alivia la carga de la memoria, necesaria para chequear las previsiones del modelo o para sostener simultáneamente más de un modelo. (SANTOS, OTERO e FANARO, 2000, p. 53).

Além disso, supõe-se também que esses modelos podem ser simulados em computador. (MOREIRA, 1996, p. 210).

Em busca de uma maior funcionalidade para os professores, uma vez que é consideravelmente simples de utilizar, adotaremos como uma das plataformas de criação o *software* PowerPoint da Microsoft para criar as animações computacionais introdutórias dos conceitos tratados. Segundo o site³⁴ da empresa criadora, o PowerPoint é "um aplicativo visual e gráfico, usado principalmente para criar apresentações. Com ele, você pode criar, visualizar e mostrar apresentações de slides que combinam texto, formas, imagens, gráficos, animações, tabelas, vídeos e muito mais". (MICROSOFT, 2015). Mas, como já afirmamos anteriormente, sobre as possibilidades do PowerPoint:

Exibir as reais possibilidades de criação do Microsoft PowerPoint tangencia, a nosso ver, elencar os possíveis frutos da criatividade; em resumo, diante do amplo espectro de possibilidades, explorá-las constitui-se em um exercício enormemente recorrente e por esta razão, educacionalmente recomendável e encorajador. (SANTOS JÚNIOR e BASTOS FILHO 2014, p. 3).

Utilizaremos, ainda, para criarmos nossas animações fieis aos modelos teóricos, o software Modellus, sendo este último uma plataforma de modelagem computacional baseada em notações matemáticas. Segundo a Home Page³⁵ do mesmo, podemos descrevê-lo como:

O Modellus é usado para introduzir a modelação computacional, para permitir uma criação fácil e intuitiva de modelos matemáticos usando apenas notação matemática padrão, por ter a possibilidade de criar animações com objetos interativos que têm propriedades matemáticas expressas no modelo, para permitir a exploração de múltiplas representações e para permitir a análise de dados experimentais em forma de imagens, animações, gráficos e tabelas. O principal foco do Modellus é a modelação e o significado dos modelos. (MODELLUS, 2015).

Ainda na mesma Home Page³⁶, é descrita como uma das principais características, a funcionalidade desse software para criar modelos matemáticos e simulações dos mesmos. Fundamenta sua eficiência como ferramenta de ampliação dos horizontes cognitivos do estudante através da utilização dos cálculos

³⁴ Disponível em: <https://support.office.com/pt-br/article/Tarefas-b%C3%A1sicas-no-PowerPoint-2010-35308dfb-792d-400a-b69a-1188b019c66a?ui=pt-BR&rs=pt-BR&ad=BR#__toc255815779>. Acesso em: 30/08/2015).

³⁵ Disponível em: <<http://modellus.co/index.php/pt/sobre/37-o-que-e>>. Acesso em: 30/08/2015.

³⁶ Disponível em: <<http://modellus.co/index.php/pt/sobre/37-o-que-e>>. Acesso em: 30/08/2015.

matemáticos de uma teoria e da visualização dos resultados através de simulação. Como vemos abaixo:

No processo de investigação científica, a modelação computacional desempenha um papel importante na ampliação do horizonte cognitivo matemático através de cálculos, e capacidades de visualização e exploração mais poderosos. A modelação com métodos e ferramentas computacionais é um aspecto importante nos ambientes de aprendizagem inspirados em investigação científica. Neste contexto, é crucial alcançar, inicialmente, uma integração da computação científica de uma forma que seja balanceada com a teoria e a experiência. Só assim os processos de aprendizagem e de ensino podem estar em sintonia com a investigação científica moderna, onde a computação é tão importante quanto a teoria e a experiência, e com o rápido desenvolvimento, em paralelo da tecnologia. (MODELLUS, 2015).

Nesse trabalho, criamos animações gráficas que se propõem a simular situações e experimentos físicos que abordam conceitos pertinentes ao caso da Gravitação Universal. Ao trabalhar com simulações poderemos ir além do conteúdo pretendido, pois “Simulações podem ativar habilidades relacionadas aos processos científicos dos estudantes. Essas não são nada menos que são habilidades básicas para a pesquisa científica³⁷”. (ROTH e ROYCHOUDHURY, apud SAHIN, 2006, p 138, tradução nossa). Nosso produto educacional poderá servir de apoio para os professores do ensino médio e superior em suas aulas expositivas e teóricas. Mas também reconhecemos que:

Nenhuma simulação de uma situação física pode ser confundida com a realidade. Não estamos pensando em substituir as atividades de laboratório, que são indispensáveis. Pelo contrário, estamos defendendo a possibilidade de contar com um livro animado, sobretudo naqueles momentos em que trabalhamos com as magnitudes do modelo e queremos compreender suas relações, suas dependências, e dotar de significado as expressões matemáticas³⁸. (SANTOS, OTERO e FANARO, 2000, p. 65, tradução nossa).

Acompanhando as animações temos um texto de apoio, capítulo 2, no qual aspectos históricos e conceituais são explicados e dessa forma servem como um guia para o professor. Por fim temos que nossas simulações e modelagens gráficas são modelos de ensino com a finalidade facilitar a produção de modelos mentais mais próximos dos modelos conceituais pertinentes ao caso da unificação.

³⁷ "Simulations can activate science process skills of students, which are the basic skills for scientific inquiry." (Roth and Roychoudhury, apud SAHIN, 2006, p 138).

³⁸ Ninguna simulación e una situación física puede ser confundida con la realidad , no estamos pensando en sustituir las actividades del laboratorio, que son indispensables. Por el contrario, estamos sosteniendo la posibilidad de contar con un libro que se anima , sobre todo en aquellos momentos en los que trabajamos con las magnitudes del modelo y queremos comprender sus relaciones, sus dependencias, y dotar de significado a las expresiones matemáticas. (SANTOS, OTERO e FANARO, 2000, p. 65).

5. METODOLOGIA

5.1 NATUREZA DESTA PESQUISA

Nossa pesquisa é de natureza qualitativa, a qual, segundo Minayo (2001), se ocupa de relações, processos e fenômenos que não podem ser operacionalizados em variáveis. Ou seja, se ocupa com um nível de realidade não quantificável. Situada no âmbito da *Sociologia Compreensiva* (MINAYO, 2011), as pesquisas qualitativas buscam compreender e explicar as dinâmicas das relações sociais.

Num embate frontal com o Positivismo, a Sociologia Compreensiva propõe a subjetividade como o fundamento do sentido da vida social e defende-a como constitutiva do social e inerente à construção da objetividade nas ciências sociais. (MINAYO, 2001, p. 24).

No presente trabalho, não pretendemos aplicar uma concepção estrutural da metodologia, a qual, segundo Franco (2011), considera que o papel da metodologia resume-se a organização de procedimentos objetivos para captar dados empíricos. De acordo com essa concepção, a pesquisa partiria dos fatos a uma suposta apreensão da realidade, por meio de quaisquer métodos. Ao invés disso, buscamos a aplicação da concepção reflexiva, que consiste em ter a metodologia como organizadora de todo o movimento reflexivo "do sujeito ao empírico e deste ao concreto, até a organização de novos dados, que permitam nova leitura/compreensão/interpretação do empírico inicial". (FRANCO, 2011, p. 107). Por fim citamos Gatti, no bojo de nossa busca:

Há que se debruçar sobre as questões de base, há que se manter a capacidade de questionar viva e atuante, há que se ter solidez teórica e dúvida metódica, há que se temer dogmas e verdades fáceis e antecipadas. (GATTI apud FRANCO, 2011, p. 109).

5.2 OBJETO

O objeto desta pesquisa compõem-se de animações, simulações e modelagens computacionais voltadas para alunos do ensino médio e superior. Inicialmente buscaram-se as animações e simulações apresentadas no artigo LEIS DE NEWTON, UM LABORATÓRIO VIRTUAL, artigo apresentado no terceiro Encontro Alagoano de Ensino de Ciências e Matemática (III EECM) em 12 de dezembro de 2014, na Universidade Federal de Alagoas (UFAL); Busca-se, ainda, utilizando o Software Modellus, produzir modelagens computacionais sobre o

experimento idealizado por Galileu intitulado Plano Inclinado, sobre um Lançamento Oblíquo de projéteis e sobre o movimento circular uniforme, experimentos que, juntos, acreditamos favorecer a compreensão de parte da Física diretamente envolvida no caso da unificação. Essas animações, simulações e modelagens computacionais foram escolhidas por tratarem de experimentos já utilizados em sala de aulas, a nível real, ou por possuírem grande valor histórico.

5.3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Na construção desta pesquisa, foram utilizados os seguintes procedimentos:

- Revisão bibliográfica da física envolvida na criação da teoria da Gravitação Universal de Newton;
- Reconstrução teórica da teoria da Gravitação Universal com análise epistemológica do método de concepção;
- Revisão bibliográfica da teoria dos Modelos Mentais com enfoque na abordagem de Johnson-Laird;
- Revisão bibliográfica sobre objetos de aprendizagem;
- Construção de animações e simulações de um experimento de inspiração no PSCS (Physical Science Committee Study), onde dois carrinhos, digamos para fixar as ideias, de massas M e $3M$ interagem entre si através de uma mola supostamente sem peso e sem massa, tratando assim, empiricamente das Leis de Newton, bases para a Gravitação Universal;
- Construção de modelagens computacionais do Plano Inclinado de Galileu, de um movimento circular descrito por um barbante preso a uma pedra ou por um planeta, de um lançamento de projéteis em direção oblíqua e de uma queda livre;
- Análise das simulações computacionais desenvolvidas, à luz da teoria dos modelos mentais e da fundamentação teórica que justifica a necessidade de objetos de aprendizagem no ensino de Física.

Fluxograma 01: Procedimentos para a realização da pesquisa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3.1 Leis de Newton, um laboratório virtual

A construção do artigo, Leis de Newton, um laboratório virtual (Apêndice 01) trata da criação e da utilização de um conjunto de animações gráficas baseadas nas três leis de Newton e na lei da Gravitação Universal, também, de Isaac Newton. Utilizou-se Newton (1687), Levy (2011) e Celestino (2006) como referências e, como plataforma para criar essas animações, fez-se uso do software Microsoft PowerPoint. Também apresentamos e discutimos as vantagens de um experimento virtual em contraposição ao assim dito experimento real. Defendemos que uma forma não é necessariamente excludente da outra, uma vez que ambas são válidas enquanto expedientes relevantes de aprendizagem, podendo ainda ser complementares e potencializadas em diversas situações de ensino. Argumentamos, também, em prol das vantagens para a aprendizagem dos conceitos científicos abordados por ambos os meios, virtual e real, enfatizando a sua melhor adequação, a exemplo, a terceira lei de Newton, ou seja, da igualdade dos módulos entre ação e reação em uma interação de dois corpos.

Argumentamos ainda em defesa de um ensino que faça uso de experimentos virtuais, entre outras características, pela sua grande mobilidade. Outrossim, discutimos mediante o exemplo da Lenda da Maçã de Newton que formas folclóricas

utilizadas em diversas situações de ensino podem acarretar distorções na ensino/aprendizagem que dificultam uma compreensão adequada da natureza da ciência por parte dos estudantes.

Construímos a simulação do laboratório virtual baseando-nos em um experimento pertencente ao PSSC (Physical Science Committee Study). O mesmo consiste em dois carrinhos de massas M e $3M$ interagindo entre si através de uma mola de massa desprezível.

No primeiro estágio os dois carrinhos estão em repouso sobre uma bancada, no segundo estágio do experimento pressionamos um carrinho contra o outro e os liberamos sendo eles empurrados pela mola. O terceiro estágio tem início no exato instante em que um carrinho não mais interage com o outro, pois a mola não os conecta mais; tendo em vista que acabada a interação cada carrinho adquire uma correspondente velocidade final, então as duas velocidades finais correspondentes podem ser medidas tendo em vista que os mesmos emitem som ao colidirem com anteparos fixos a certa distância do ponto inicial e em lados opostos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, somos conduzidos às nossas considerações finais. Tendo em vista que o objetivo geral deste trabalho foi desenvolver objetos de aprendizagem voltados para o caso da Unificação de Newton da Física de Galileu com a Astronomia de Kepler, procuramos explorar as possibilidades facilitadoras de aprendizagem que podem ser propiciadas pelo uso dos objetos desenvolvidos (simulações e modelagens computacionais). Procuramos também discutir como o conhecimento poderia ser produzido a partir da metodologia utilizada na apresentação do objeto e a forma como o mesmo poderia ser aprendido pelo aluno a partir da sequência metodológica desenvolvida. O tema tratado foi o de um episódio específico da ciência relativo à unificação newtoniana da Física de Galileu com a Astronomia de Kepler, para ao final chegamos às conclusões descritas nos parágrafos seguintes.

Considerando que Newton para unificar a Física de Galileu com a Astronomia de Kepler precisou assumir uma conjectura de universalidade capaz de unir céus e terra e que, à luz da crítica de Popper, Newton jamais teria realizado tal empreendimento, quer seja por indução quer seja por dedução, então concluímos que estas apenas o auxiliaram, pois, como vimos à luz dos argumentos de Charles Sanders Peirce, a inferência abdutiva é a única capaz de justificar tal feito.

Considerando que em nossa reconstrução teórica utilizamos ferramentas matemáticas e argumentos filosóficos que estão ao alcance de professores e estudantes que se proponham a compreendê-los e mesmo, que eles pretendam utiliza-los em outras análises concluímos ser nossa reconstrução teórica adequada para a utilização em sala de aula. Deste modo, consideramos o objetivo específico de elaborar uma construção teórica da Unificação de Newton da Física de Galileu com a Astronomia de Kepler à luz da análise popperiana, como um objetivo alcançado, embora não haja propriamente um método prescritivo nem determinista para descrever tal notável empreendimento de unificação, certamente ele é bem mais nobre que se fosse meramente circunscrito a inferências indutivas e dedutivas. De fato, tal inferência pertence a um nível bem mais alto de criatividade a qual adotamos ser relacionado com a abdução. Considerando como objetivo aplicar a teoria dos modelos mentais, no enfoque de Johnson-Laird (2005), e a abordagem de

Wiley (2000) como suporte da psicologia educacional no desenvolvimento metodológico de objetos virtuais de aprendizagem da simulação computacional nos voltamos a envidar esforços pedagógicos para a compreensão do caso da unificação newtoniana da Física de Galileu com a Astronomia de Kepler. O que discutimos no capítulo 3 e à luz da Teoria de Johnson-Laird, é que a mente funciona através de representações mentais que, analogicamente, se relacionam a procedimentos computacionais sobre essas representações, ou seja vige em larga medida a metáfora da mente como um computador. Estamos propondo que, para a formação de modelos mentais adequados convém Admitir demonstrações adequadas dos fenômenos estudados. Isto é importante para facilitar a criação desses modelos mentais a fim de que venham a se adequar aos modelos científicos. Deste modo, consideramos serem as simulações e modelagens computacionais, se bem conduzidos metodologicamente, instrumentos adequados para a compreensão de fenômenos físicos em estudo (uma ferramenta de maior conveniência no ensino-aprendizagem pela simulação computacional do conteúdo físico).

Considerando o que discutimos no capítulo 4 sobre Objetos Virtuais de Aprendizagem, o que os caracteriza, os princípios que os definem, as vantagens de sua utilização, em especial as simulações e modelagens computacionais, concluímos que o software Modellus seria o mais conveniente pra criação de nossas modelagens e simulações, associado ao software Power Point. Concluímos ainda, ser de maior eficiência simular e modelar experimentos específicos de valor histórico e eficiência comprovada, seja como fenômeno que possibilitou a criação da teoria que o define, seja como experimento educacional já utilizado e de eficiência comprovada.

Considerando que as simulações e modelagens computacionais, enquanto representações objetivas dos fenômenos em estudo, com redução do ruído cognitivo, simplificação da realidade, baixo custo de produção comparados aos experimentos reais, facilidade em testar novos valores e sendo ainda possuidoras de um teoria subjacente que está de acordo com o modelo matemático compatível com a teoria, então concluímos que as mesmas se constituam em enorme vantagem comparativa pedagógica e assim podem facilitar a criação, por parte do estudante, de modelos mentais mais próximos dos modelos conceituais. Deste modo, tais simulações podem ensejar mais agilmente a pretendida compreensão que é uma das finalidades precípuas do processo de ensino e aprendizagem.

Considerando que os elementos constituintes da nossa sequencia didática, enquanto simulações e modelagens computacionais atendem a uma considerável quantidade dos princípios descritos no capítulo 4, então somos levados à conclusão da adequação e da pertinência desta nossa proposta.

Para fixar as ideias, os princípios incorporados em nossa abordagem didática compreendem: (i) a flexibilidade; (ii) a facilidade para a atualização; e (iii) a interoperabilidade ensejada pela abordagem que inclui tratamento por níveis crescentes de dificuldade dos conceitos veiculados no capítulo 2. Faz-se mister ressaltar que este último princípio é um elemento constituinte e indispensável para a compreensão da história e dos conceitos físicos tratados. Assim sendo, concluímos que tais simulações satisfazem o objetivo pretendido inicialmente que foi o de criar objetos virtuais de aprendizagem, animações por computador, modelos digitais ou simulações computacionais, que de fato são facilitadores da compreensão da Unificação Newtoniana da Física de Galileu com a Astronomia de Kepler.

Enfatizamos uma vez mais que o objetivo específico de buscar aplicar a teoria dos Modelos Mentais, no enfoque de Johnson-Laird, e a abordagem de Wiley sobre Objetos de Aprendizagem na criação de simulações e Modelagens computacionais voltadas para o caso da Unificação de Newton da Física de Galileu com a Astronomia de Kepler, foi enfim satisfeito.

Por fim, torna-se necessário declarar a necessidade de submissão ao crivo da experimentação os Objetos Virtuais de Aprendizagem aqui construídos, ficando, para um posterior trabalho a validação correspondente.

Como palavras finais, somos chegados à conclusão que o objetivo geral de buscar aplicar a teoria dos Modelos Mentais, no enfoque de Johnson-Laird, e a abordagem de Wiley sobre Objetos de Aprendizagem na criação de simulações e Modelagens computacionais voltadas para o caso da Unificação de Newton da Física de Galileu com a Astronomia de Kepler, foi desta maneira, atingido.

7 REFERÊNCIAS

ABBAGNANO, N.; **Dicionário de Filosofia**. Tradução de Alfredo Bosi. São Paulo: Ed. Martins Fontes, 2007.

ARRUDA; D. M. **Modelos Mentais**. Nota técnica. [S.L.]: Instituto Nacional de Tecnologia, Ministério da Ciência e Tecnologia, 2003. Disponível em: <<http://www.nutes.ufrj.br/abrapec/ixenpec/atas/resumos/R0591-2.pdf>> Acesso em 01 mar. 2015.

BASTOS FILHO, J. B. A unificação de Newton da física de Galileu com a astronomia de Kepler à luz da crítica Popperiana à indução. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. vol. 17, n. 3, p.233-242, 1995. Disponível em <<http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/vol17a28.pdf>> Acesso em 06 abr. 2014.

BERTRAND, J. **Os Fundadores da Astronomia Moderna**: Copérnico, Tycho Brahe, Kepler, Galileu, Newton. [S.L.]: Ed. Contraponto, 1865.

BORGES, A. T. Um estudo sobre os modelos mentais. **Investigações em Ensino de Ciências**. v. 2, [s.n.], p. 207-226, 1997.

BRUNER, J. **A Cultura da Educação**. Porto Alegre: Artmed, 2001.

BRYANT, W. W. **Kepler**: Pioneers of progress. New York: The Macmillan Company, 1920.

BYRNE, R.M.J.; JOHNSON-LAIRD, P.N. **'If' and the problems of conditional reasoning**. Trends in Cognitive Sciences. Disponível em: <https://psych.princeton.edu/~psych/psychology/research/johnson_laird/publications.php> Acesso em 10/01/2015.

BYRNE, R. M. J.; QUELHAS, A. C. Raciocínio contrafactual e modelos mentais. **Análise Psicológica**. v. 4, [s.n.], p. 713-721, 1999. Disponível em: <<http://www.scielo.mec.pt/pdf/aps/v17n4/v17n4a07.pdf>> Acesso em 10/01/2015.

CACHAPUZ, A. **A necessária renovação do ensino das ciências**. São Paulo: Ed. Cortez, 2005.

CASTELLANI, O. C. Discussão dos Conceitos de Massa Inercial e Massa Gravitacional. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 23, n. 3, p. 356-359, 2000.

CASTRO, A. D.; CARVALHO, A. M. P. **Ensinar a ensinar**: didática para a escola fundamental e média. São Paulo: Ed. Thomson Learning, 2006.

COLL, C.; MARCHESI, Á.; PALACIOS, J. Desenvolvimento Psicológico e Educação. **Psicologia da Educação Escolar**. v. 2; [s.n.], p. 81-93, 2004.

COMENIUS, J. A. **Didática Magna**. Disponível em: <<http://www.ebooksbrasil.org/adobeebook/didaticamagna.pdf>> Acesso em 20 Ago. 2012.

CONTADOR, P. R. M. **Kepler: O legislador dos céus**. São Paulo: Livraria Da Física, 2012.

DAMASIO, F. O início da revolução científica: questões acerca de Copérnico e os epiciclos, Kepler e as órbitas elípticas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 33, n. 3, 2011.

DE PAIVA, J. **As Tecnologias de informação e Comunicação**: utilização pelos professores. Coimbra, Portugal: Ministério da Educação, Centro de Física Computacional da Universidade de Coimbra, Centro de competências e Softciências, 2002. Disponível em: <<http://nautilus.fis.uc.pt/cec/estudo/>>. Acesso em 09 jun. 2012.

DIAS, P. M. C; SANTOS, W. M. S.; SOUZA, M. T.M. A Gravitação Universal: Um texto para o Ensino Médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 26, n. 3, p. 257-271, 2004.

DUSSEL, I. **A invenção da sala de aula**: uma genealogia das formas de ensinar. São Paulo: Ed. Moderna, 2003.

FEYRABEND, P. K. **Adeus à Razão**. Brasil: Ed. Edições 70, 1991.

FIOLHAIS, C.; TRINDADE, J. Física no Computador: o Computador como uma Ferramenta no Ensino e na Aprendizagem das Ciências Físicas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 25, n. 3, 2003.

GARCÍA-MADRUGA, Juan A; GUERREIRO, J.; QUELHAS, Ana C. Memória de trabalho e inferência silogística: Estudo exploratório de novas medidas. **Análise Psicológica**. v. 2, [s.n.], p.131-148, 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.mec.pt/pdf/aps/v24n2/v24n2a01.pdf>> Acesso em 10/01/2015.

GAROZZO, F. **Johannes Kepler: Os homens que mudaram a humanidade**. São Paulo: Editora Três, 1975.

GALILEU, G. **Dois Novas Ciências**. Incluindo: Da Força de Percussão. Tradução e notas de Letizio Mariconda e Pablo R. Mariconda. São Paulo: Ed. Nova Stella, 1935.

GALILEU, G. **Coleção Os Pensadores**, São Paulo, ed. Nova Cultural, 1973.

GEORGE, A. Miller; JOHNSON-LAIRD, P. N. **Language and Perception**. Cambridge, Massachusetts: Cambridge University Press, Harvard University Press, 1976. Disponível em: <https://psych.princeton.edu/~psych/psychology/research/johnson_laird/publications.php> Acesso em 10/01/2015.

GREGORY, T.; JOHNSON-LAIRD, P.N.; SANGEET, K. J. **Deduction as stochastic simulation**. Disponível em: <<http://mentalmodels.princeton.edu/papers/2013ded-as-stochastic-sim.pdf>> Acesso em 10/10/2014.

HILL, W F. **Aprendizagem**. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara Dois S. A., 1981.

HILGARD, E. R. **Teorias da Aprendizagem**. São Paulo: Ed. E.P.U., 1975.

JOHNSON-LAIRD, P.N.; WASON, P.C. (eds.). **Thinking**. Cambridge: Cambridge University Press, 1977. Disponível em: <https://psych.princeton.edu/~psych/psychology/research/johnson_laird/publications.php> Acesso em: 10/01/2015.

JOHNSON-LAIRD, P.N. **Mental Models**. Cambridge, Massachusetts: Cambridge University Press, Harvard University Press, 1983. Disponível em: <https://psych.princeton.edu/~psych/psychology/research/johnson_laird/publications.php> Acesso em 10/01/2015.

JOHNSON-LAIRD, P.N. **The Computer and the Mind: An Introduction to Cognitive Science**. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1988. London: Fontana, 1993. 2. ed. Disponível em: <https://psych.princeton.edu/~psych/psychology/research/johnson_laird/publications.php> Acesso em 10/01/2015.

JOHNSON-LAIRD, P.N. Reasoning. In: RABBITT, P. (ed.) **Inside Psychology: A Science over 50 Years**. Oxford: Oxford University Press, 2009. Disponível em: <https://psych.princeton.edu/~psych/psychology/research/johnson_laird/publications.php> Acesso em 10/01/2015.

JOHNSON-LAIRD, P.N. **The history of mental models**. Cambridge, Massachusetts: Cambridge University Press, Harvard University Press, 2005. Disponível em: <<http://mentalmodels.princeton.edu/papers/2005HistoryMentalModels.pdf>> Acesso em 10/01/2015.

JOHNSON-LAIRD, P.N. Mental models and cognitive change. **Journal of Cognitive Psychology**. v. 25, n. 2, p. 131-138, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/20445911.2012.759935>> Acesso em 10/01/2015.

JOHNSON-LAIRD, P.N.; BYRNE, R.M.J.; Girotto, V. **The mental model theory of conditionals**. Disponível em: <https://psych.princeton.edu/~psych/psychology/research/johnson_laird/publications.php> Acesso em 10/01/2015.

JOHNSON-LAIRD, P.N. **How we reason: A view from psychology**. Disponível em: <https://psych.princeton.edu/~psych/psychology/research/johnson_laird/publications.php> Acesso em 10/01/2015.

JOHNSON-LAIRD, P.N. Mental models and deductive reasoning. In: RIPS, L.; Adler, J. (eds.): **Reasoning: Studies in Human Inference and Its Foundations**. Cambridge: Cambridge University Press. Disponível em: <https://psych.princeton.edu/~psych/psychology/research/johnson_laird/publications.php> Acesso em 05/03/2015.

JOHNSON-LAIRD P. N.; QUELHAS, A. C. Conhecimentos, modelos, e raciocínio condicional. **Análise Psicológica**. v. 2, [s.n.], p.309-317, 2004. Disponível em: <<http://www.scielo.mec.pt/pdf/aps/v22n2/v22n2a01.pdf>> Acesso em 06/02/2015.

JOHNSON-LAIRD, P.N.; YANG, Y. Mental logic, mental models, and computer simulations of human reasoning. In: SUN, R. (ed.). **Cambridge Handbook of Computational Psychology**. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. Disponível em: <https://psych.princeton.edu/~psych/psychology/research/johnson_laird/publications.php> Acesso em 10/01/2015.

KUHN, T. S. **A Revolução Copernicana**. Rio de Janeiro: Edições 70, 1990.

JUNIOR, L. A. R.; CUNHA, M. F.; LARANJEIRAS, C. C. Simulação de experimentos históricos no ensino de física: uma abordagem computacional das dimensões histórica e empírica da ciência na sala de aula. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 34, n. 4, 2012.

LÉVY, P. **O que é o virtual?** Tradução de Paulo Neves. 2. ed. São Paulo: Ed. 34, 2011.

LÉVY, P. **As tecnologias da inteligência: o futuro do pensamento na era da informática**. Tradução de Carlos Irineu da Costa. 2. ed. Rio de Janeiro: Ed. 34, 2011.

MARTINS, A. F. P. **Física ainda é cultura?** São Paulo: Livraria da física, 2009.

MEDEIROS, A.; MEDEIROS, C. F. Possibilidades e Limitações das Simulações Computacionais no Ensino da Física. **Revista Brasileira do Ensino de Física**. v. 24, n. 2, 77-86, 2002.

MINAYO, Maria Cecília de Souza (org.). **Pesquisa Social: Teoria, método e criatividade**. 18. ed. Petrópolis: Vozes, 2001. Disponível em: <http://www.faed.udesc.br/arquivos/id_submenu/1428/minayo__2001.pdf> Acesso em: 05/03/2015.

MOREIRA, M. A. Modelos Mentais. **Investigações em Ensino de Ciências**. V. 1, [s.n.], p.193-232, 1996.

NASCIMENTO, Anna C. de Azevedo. **Objetos de aprendizagem: uma proposta de recurso pedagógico**. Organização de Carmem Lúcia Prata. Brasília: MEC, SEED, 2007. Disponível em: <<http://rived.mec.gov.br/artigos/livro.pdf>> Acesso em 05/03/2015.

NEWTON, I. **Coleção Os Pensadores**. São Paulo: Ed. Nova Cultural, 1973.

NEWTON, I. Princípios Matemáticos da Filosofia Natural (Escólio Geral). In: **Coleção Os Pensadores** - Vol. Galileu & Newton. Tradução de Carlos Lopes de Matos e Pablo Rubén Mariconda. São Paulo: Nova Cultural, 1987.

NUÑEZ, I. B.; RAMALHO, B. L. **Fundamentos do Ensino-Aprendizagem das Ciências Naturais e da Matemática**: o novo Ensino Médio. Porto Alegre: Ed. Sulina, 2004.

PEIRCE, C. S. Estudos Coligados: Conferências sobre o Pragmatismo. In: CIVITA, V. (ed.). **Coleção Os Pensadores**: Skinner/Piaget. 1. ed. São Paulo: Ed. Abril Cultural, 1975.

POPPER, K. R. **Conjecturas e Refutações**. 4. ed. Brasília: Ed. Universidade de Brasília, 1972.

POPPER, K. R. **Coleção Os Pensadores**, São Paulo, ed. Nova Cultural, 1973.

POPPER, K. R. **Conocimiento objetivo**. Madrid: Ed. Editorial Tecnos, 1974.

POPPER, K. R. **A lógica da pesquisa científica**. São Paulo: Cultrix, 1993.

POPPER, K. R. **Conjecturas e Refutações**. Brasília: Ed. Universidade de Brasília, 1994.

POZO, J. I.; CRESPO, M. A. G. **A aprendizagem e o ensino de ciências**: do cohecimento cotidiano ao conhecimento científico. 5. ed. Porto Alegre: Artimed, 2009.

PRATA, C. L.; NASCIMENTO A. C. A. **Objetos de aprendizagem**: uma proposta de recurso pedagógico/Organização. Brasília: MEC-SEED, 2007.

QUELHAS, A. C.; JULHOS, C.; SENOS, J.; ROCHA, T. A. Desenvolvimento do raciocínio condicional e modelos mentais. **Análise Psicológica**. v. 4, [s.n.], p. 695-711, 1999. Disponível em: <<http://www.scielo.mec.pt/pdf/aps/v17n4/v17n4a06.pdf>> Acesso em 05/06/2015.

RAPPAPORT, C. R.. **Psicologia do desenvolvimento**, v. 1. p. 51-65. São Paulo: Editora Pedagógica Universitária LTDA. 1981.

SAHIN, S. Computer simulations in science education: Implications for Distance Education. **Turkish Online Journal of Distance Education - TOJDE**. v. 7, n. 4, p.132-146, 2006. Disponível em <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.114.8977&rep=rep1&type=pdf>> Acesso em 05/06/2015.

SANTOS, G.; OTERO, M. R.; FANARO, M. A.; ¿Cómo usar software de simulación en clases de física? **Caderno Catarinense de Ensino de Física**. v. 17, p.50-66, 2000.

SANTOS JÚNIOR, E.; BASTOS FILHO, J. B. **Leis de Newton**: um laboratório virtual. Artigo apresentado no III Encontro Alagoano de Ensino de Ciências e Matemática. Mestrado em Ensino de Física. Programa de Pós Graduação em Ensino de Ciências e Matemática da Universidade Federal de Alagoas. 2º semestre de 2014. Disponível em <<https://drive.google.com/file/d/0B1r7lhyJF1WPT1gzblhXS0NRTEk/view?pli=>> Acesso em 6 jan. 2016.

SKINNER, B. F.; PIAGET, J. Contingências do reforço: A epistemologia genética. In: **Coleção Os Pensadores**. 1. ed. São Paulo: Abril Cultural. 1975.

SILVA, Ana Paula R. C. Figueiredo. **Metamorfoses do conceito de abdução em Peirce**: o exemplo de Kepler. 2007. Dissertação. Faculdade de Ciências, Secção de história e filosofia das Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2007.

TEIXEIRA, E. S. Os caminhos de Newton para a gravitação universal: uma revisão do debate historiográfico entre Cohen e Westfall. **Caderno Brasileiro de Ensino da Física**. v. 27, n. 2, p. 215-254, 2010.

VALDIVIA, I. J. **Las políticas de tecnología para escuelas en América Latina y el mundo**: visiones y lecciones. Disponível em <<http://www.cepal.org/SocInfo>> Acesso em nov. 2008.

VEIT, E. A.; TEODORO, V.D. Modelagem no Ensino/Aprendizagem de Física e os Novos Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 24, n. 2, 2002.

WILEY, D. A. Connecting learning objects to instructional design theory: A definition, a metaphor and a taxonomy. In: WILEY, D. A. (ed.). **The Instructional Use of Learning Objects**: Online Version. Utah: Utah State University, 2000. Disponível em: <<http://reusability.org/read/chapters/wiley.doc>> Acesso em 05/06/2015.

WITTGENSTEIN, I. **Tractatus Logico-Philosophicus**. London: Kegan Paul, 1922. Disponível em: <<http://people.umass.edu/klement/tlp/>> Acesso em 13/04/2015.

WITTGENSTEIN, L. Investigações Filosóficas. Tradução de José Carlos Bruni. In: **Coleção Os Pensadores**. São Paulo: Ed. Nova Cultural, 1973.

APÊNDICE A

LEIS DE NEWTON, UM LABORATÓRIO VIRTUAL

LEIS DE NEWTON, UM LABORATÓRIO VIRTUAL

Edson Santos Júnior
professorredsonjunior@gmail.com

Jenner Barretto Bastos Filho
jenner@fis.ufal.br

RESUMO

O presente artigo trata da criação e da utilização de um conjunto de animações gráficas baseadas nas três leis de Newton e na lei da Gravitação Universal do mesmo autor. Como norte, nos baseamos em Newton, Levy e Celestino e como plataforma de criação dessas animações utilizamos o Microsoft PowerPoint. O artigo também apresenta e discute as vantagens de um experimento virtual no confronto com o assim chamado experimento real. Argumentamos que uma forma não tem necessariamente que excluir a outra, pois ambas são válidas enquanto expedientes relevantes de aprendizagem, além de poderem ser complementadas e potencializadas em diversas situações de ensino. Discutimos também as vantagens para a aprendizagem dos conceitos científicos ensejados por ambas as abordagens, virtual e real, enfatizando a sua melhor adequação, por exemplo, no caso da aprendizagem da terceira lei de Newton, ou seja, da igualdade, em módulo, entre ação e reação em uma interação a dois corpos. Na referência tradicional de um soco dado na parede, a parte mais interessante e visível do conteúdo é obscurecida. Argumentamos também em prol de um ensino que lança mão de experimentos virtuais pela sua enorme mobilidade comparadamente ao ensino realizado com experimentos assim chamados de reais. Discutimos, outrossim, mediante o exemplo da Lenda da Maçã de Newton que formas folclóricas utilizadas em diversas situações de ensino também acarretam distorções que formam obstáculos para uma compreensão adequada da natureza da ciência por parte dos estudantes. Trouxemos à baila também a discussão segundo a qual a atitude de se interpretar o insight newtoniano à luz da ideia de Peirce de insight abduutivo, não implica em concebê-lo de maneira carregada tanto de mistificação quanto de mitificação. O insight abduutivo de grande repercussão e profundidade somente ocorre nas mentes que trabalharam penosamente em cima de um dado tema e não ocorrem sem que haja condições prévias para que de fato ocorram. Enfim, discutimos que a conquista da autonomia intelectual dos sujeitos da educação requer atitude corajosa no confronto com os mitos.

PALAVRAS-CHAVE: Leis de Newton. PowerPoint. Animação Gráfica, Gravitação Universal

1 INTRODUÇÃO

O ato de ensinar é e sempre será um desafio infinitamente recorrente para os professores, principalmente no tocante aos teores e controvérsias ensejadas em prol de um ensino que se deseja de boa qualidade, bem como ainda o é no que se refere às ferramentas que devem ser utilizadas para a melhor consecução deste importante mister. Além disso, podemos aduzir mais uma dificuldade, pois adentrar a sala de aula tendo pleno domínio do conteúdo a ser ensinado, embora seja um elemento de imprescindível valor para um bom ensino, não se constitui, por si só, em algo suficiente para o cumprimento a pleno título dessa missão, pois ainda resta a necessária atitude que consiste em prover meios para facilitar o debate crítico, bem como os procedimentos, inclusive os de natureza mais técnica, para fazê-lo de forma eficiente.

Segundo Lévy (2011, p. 8) “[...] a escola é uma instituição que há cinco mil anos se baseia no falar/ditar do mestre [...] Uma verdadeira integração da informática (como do audiovisual) supõe, portanto o abandono de um hábito antropológico mais que milenar”, e essa integração tem ocorrido, também, através da utilização, cada vez mais frequente, de simulações computacionais. Na disciplina Física, o quadro negro e a pura imaginação tem dado lugar às animações gráficas por computador e, em muitos casos, verdadeiros laboratórios virtuais de simulação e modelagem computacional.

Nesse trabalho criamos animações gráficas que se propõem a simular um exemplo empírico das três leis de Newton e dessa forma servir de apoio para os professores do ensino médio em suas aulas expositivas e teóricas. Acompanhando as animações temos um texto de apoio no qual aspectos históricos e conceituais são explicados e dessa forma servem como um guia para o professor.

2 O MUNDO VIRTUAL DAS ANIMAÇÕES GRÁFICAS

O virtual permeia nossas vidas, pois somos residentes em um mundo globalizado onde o tempo e o espaço, tal como dantes os percebíamos, têm suas regras constantemente violadas pela internet com seus bancos de dados e suas simulações do mundo, da natureza e até da própria vida, pois a essência do virtual

passou a ter presença constante em nosso cotidiano, quando nos referimos a sites de relacionamentos, à dramaturgia dos filmes, às simulações de cunho científico ou financeiro e à educação. Vivemos em um mundo onde existimos e podemos existir em vários lugares e ao mesmo tempo e para isso só precisamos realizar uma vídeo conferência e pronto, estaremos aqui e lá. Mas o que é o virtual, em ótica geométrica é uma imagem formada em um lugar onde a luz refletida pelo objeto não chega, porém o vemos. No entanto, o termo transcendeu esse significado há muito e em uma tentativa de compreendê-lo, estabelecendo um novo alcance para ele, é que se torna pertinente, para os nossos propósitos aqui, trazer à baila o seguinte excerto de Pierre Levy:

A palavra virtual vem do latim medieval *virtualis*, derivado por sua vez de *virtus*, força, potência. Na filosofia escolástica, é virtual o que existe em potência e não em ato. O virtual tende a atualizar-se, sem ter passado no entanto à concretização efetiva ou formal. A árvore está virtualmente presente na semente. Em termos rigorosamente filosóficos, o virtual não se opõe ao real, mas ao atual: virtualidade e atualidade são apenas duas maneiras de ser diferentes. (LÉVY, 2011, p. 15 grifo do autor).

É no sentido de potência que as simulações computacionais de física formam laboratórios virtuais, pois nessas simulações está virtualmente presente o conhecimento abordado, o fenômeno pode ser reproduzido e ter seus valores alterados dentro de uma gama de possibilidades e, dessa forma, pode-se assistir ao mesmo e assim estudá-lo sem correr riscos, sem custos e sem tempo adicional.

Em busca de uma maior funcionalidade para os professores, usamos a plataforma PowerPoint da Microsoft para criar as simulações computacionais das quais tratamos aqui.

O PowerPoint é um software que permite a criação de materiais que podem ser apresentados por meio de um projetor. O uso desses materiais para anunciar um relatório ou uma proposta é chamado de apresentação. Com o PowerPoint, você pode criar telas que incorporam de forma eficiente texto colorido e fotografias, ilustrações, desenhos, tabelas e filmes, e que transitam de uma para a outra, como uma apresentação de slides. Você pode animar o texto e as ilustrações na tela, usando o recurso de animação, e também pode adicionar efeitos de som e narração. Além disso, você pode imprimir os materiais quando estiver fazendo uma apresentação. (Microsoft, 2012, np.).

Exibir as reais possibilidades de criação do Microsoft PowerPoint tangencia, a nosso ver, elencar os possíveis frutos da criatividade; em resumo, diante do amplo espectro de possibilidades, explorá-las constitui-se em um exercício enormemente recorrente e por esta razão, educacionalmente recomendável e encorajador. Neste

trabalho, tratamos apenas de simulações computacionais em termos de modelos digitais de representação da realidade, o que pode ser criado na plataforma PowerPoint uma vez que a mesma possui o recurso de animação e é de fácil utilização.

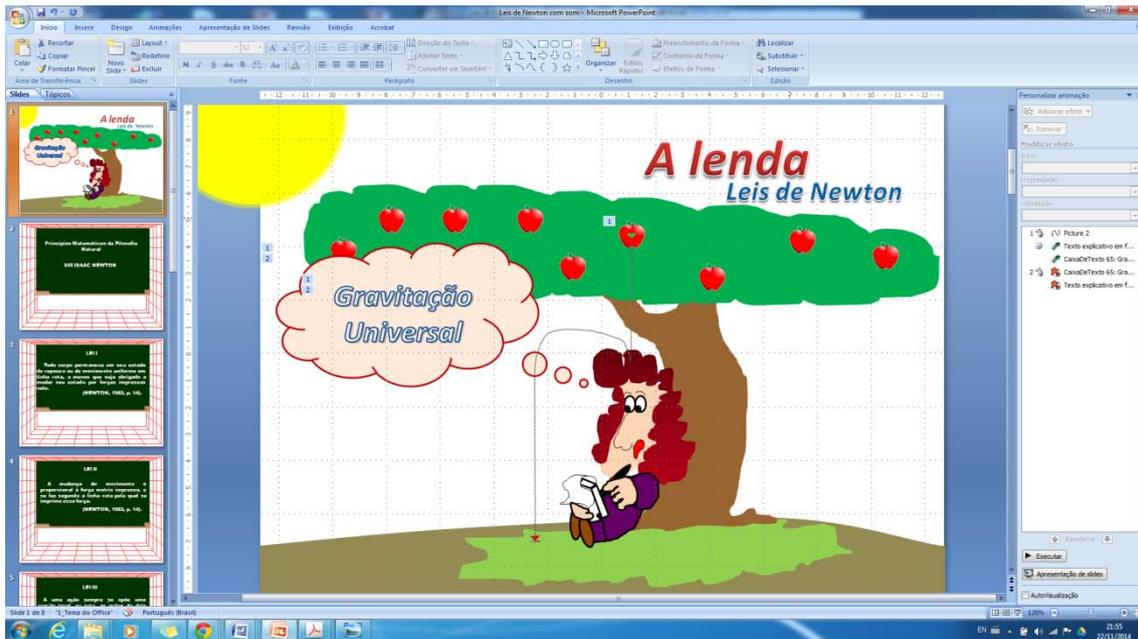
3 A LENDA DA GRAVITAÇÃO UNIVERSAL

As ciências em geral são rodeadas de lendas sobre suas leis; essas lendas prestam-se a contextualizar momentos de importantes descobertas, em geral, popularizadas ainda que com distorções; entre essas lendas temos como, talvez, a mais conhecida a da maçã de Newton. Desprezadas as variantes, podemos resumí-la como: "Newton estava sentado certo dia sob uma macieira e um fruto dessa árvore caiu em sua cabeça. O episódio teria dado a Newton a imediata compreensão da força universal da gravidade." (MOURA, CANALLE, 2001). Citemos ainda um manual britânico de treinamento para professores que afirma:

Um dia Newton estava sentado sob uma macieira em um jardim. Ele viu uma maçã caindo de uma árvore. Veio à sua mente um pensamento de que deveria haver alguma razão para a maçã cair no chão e não ir para cima. Assim ele chegou à conclusão de que existe uma força exercida pela TERRA que puxa (atrai) todos os objetos para baixo em sua direção. Depois ele deu a essa força o nome de força da gravidade. (CAMMONWEALTH SECRETARIAT apud CELESTINO, 2006 p. 168).

Ao lermos esse texto podemos concluir que Newton inventou a palavra gravidade, entretanto falava-se de gravidade há mais de mil anos antes de Cristo iniciando com sua forma latina *gravitas* e gerando, diretamente, suas correspondentes em diversos idiomas, Galileu (1632) em seu livro *Diálogo Sobre os dois principais sistemas do mundo, o Ptolomaico e o Copernicano*, também se referia à gravidade como a queda dos graves. Não temos certeza se houve realmente o episódio da maçã, mas sabemos que autores como o matemático Gauss do século XIX, duvidaram seriamente que tenha ocorrido algo do gênero.

Como ilustração para a supra citada lenda criamos uma animação desse episódio histórico que serve de pano de fundo para uma discussão na sala de aula.



Fonte: *print screen* da aplicação no sistema operacional Windows 7

Newton não inventou a gravidade; entretanto tentou entendê-la mas não como mecanismo de atração entre a terra e os corpos pesados. Numa famosa carta a Bentley ele escreveu:

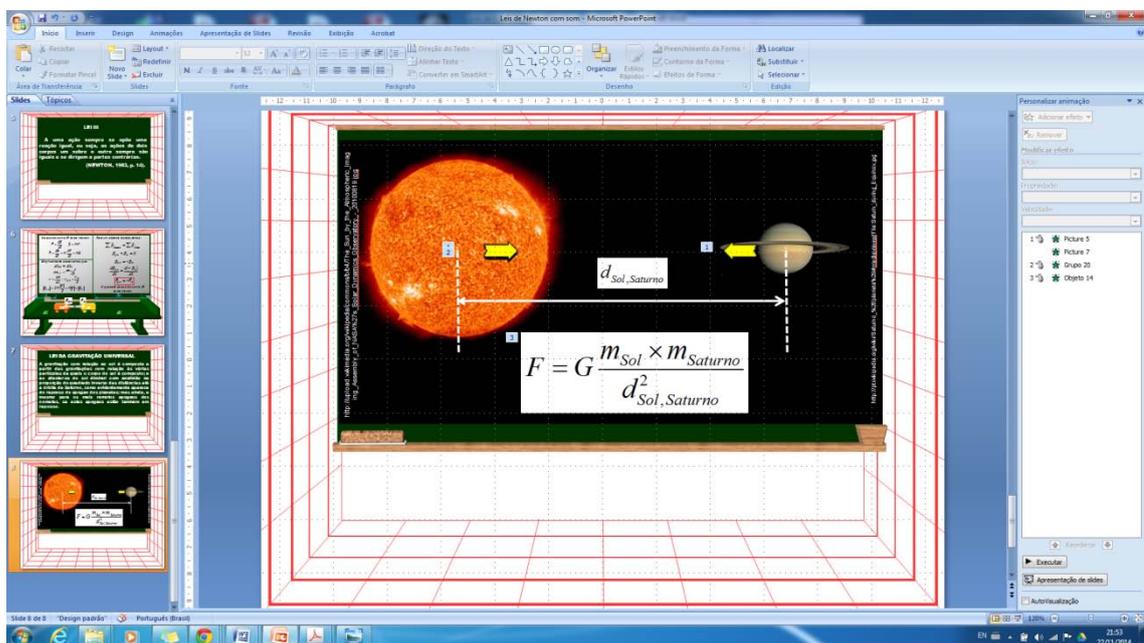
[...] que a gravidade possa ser inata, inerente e essencial à matéria, de modo que um corpo possa atuar sobre um outro à distância no vácuo sem a mediação de qualquer outra coisa pela qual sua ação e força possa ser transportada de um para outro, é para mim um absurdo tão grande que eu acredito que nenhuma pessoa que tenha uma faculdade competente de pensamento em assuntos filosóficos possa jamais cair nisso. A gravidade deve ser causada por uma agente que atua constantemente de acordo com certas leis, mas se esse agente é material ou imaterial, eu deixei à consideração de meus leitores. (NEWTON apud CELESTINO, 2006 p. 173).

Em 1687, com o título de *Princípios Matemáticos da Filosofia Natural*, Sir Isaac Newton publicou descobertas, feitas cerca de vinte anos antes, durante seu refúgio da grande peste que assolou a Grã Bretanha em 1666. Nessa obra, Newton sintetiza a astronomia de Kepler e a física de Galileu, concebendo as três leis fundamentais da mecânica e a Lei da Gravitação Universal.

Até aqui explicamos os fenômenos dos céus e de nosso mar pelo poder da gravidade, mas ainda não designamos a causa desse poder. É certo que ele deve provir de uma causa que penetra nos centros exatos do sol e planetas, sem sofrer a menor diminuição de sua força; que opera não de acordo com a quantidade das superfícies das partículas sobre as quais ela age (como as causas mecânicas costumam fazer), mas de acordo com a quantidade de matéria sólida que elas contêm, e propaga sua virtude em todos os lados a imensas distâncias, decrescendo sempre no inverso do

quadrado das distâncias. A gravitação com relação ao sol é composta a partir das gravitações com relação às várias partículas das quais o corpo do sol é composto; e ao afastar-se do sol diminui com exatidão na proporção do quadrado inverso das distâncias até a órbita de Saturno, como evidentemente aparece do repouso do apogeu dos planetas; mas ainda, e mesmo para os mais remotos apogeu dos cometas, se estes apogeu estão também em repouso. (NEWTON, 1983, p. 22).

Das palavras de Newton concluímos que “a matéria atrai a matéria na razão direta das massas e na inversa do quadrado das distâncias” (LACEY, 1983, p. IX)³⁹. Como apoio para o professor criamos a exposição adiante ilustrando a lei.



Fonte: *print screen* da aplicação no sistema operacional Windows 7

4 AS LEIS DE NEWTON

Em *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*⁴⁰, Newton enunciou os três axiomas que ficariam conhecidos como as Três Leis de Newton:

LEI I – Todo corpo permanece em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em linha reta, a menos que seja obrigado a mudar seu estado por forças impressas nele.

LEI II – A mudança do movimento é proporcional à força motriz impressa, e se faz segundo a linha reta pela qual se imprime essa força.

³⁹ LACEY, H. M., Newton, Vida e Obra, Coleção Os Pensadores, 1983, p. IX.

⁴⁰ Principios Matemáticos da Filosofia Natural

LEI III – A uma ação sempre se opõe uma reação igual, ou seja, as ações de dois corpos um sobre o outro sempre são iguais e se dirigem a partes contrárias. (NEWTON, 1983, p. 14).

Trabalharemos agora com uma notação que se constituiu em um desenvolvimento pós-newtoniano escrevendo as leis de Newton nas formas que aparecerão adiante. Da segunda lei, também conhecida como Princípio Fundamental da Dinâmica (PFD), temos que:

$$\vec{f} = \frac{d\vec{p}}{dt} \quad \text{sendo } \vec{p} = m\vec{v} \quad \text{temos:}$$

$$\vec{f} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} = m \frac{d\vec{v}}{dt}$$

Como a derivada da velocidade em relação ao tempo é a aceleração, temos então que:

$$\vec{f} = m\vec{a}$$

É importante notar neste estágio de exposição que a fórmula que expressa que a força newtoniana é o produto da massa do corpo multiplicada pela aceleração por ele sofrida constitui-se em um caso particular quando a massa newtoniana não variar com o tempo. A compreensão deste fato pode ser expressa matematicamente em termos simples. Trata-se de algo que o professor pode e deve alertar aos seus estudantes, mas não há necessidade premente de que eles já saibam de antemão o conceito de derivada do cálculo diferencial. Isso se dá, pois ao derivar em relação ao tempo a quantidade $m\mathbf{v}$, que expressa o produto da massa m pela velocidade \mathbf{v} , temos, pela regra da derivação do produto, que:

$$f = (dp/dt) = m (dv/dt) + v (dm/dt)$$

Como estamos tratando de sistemas interagentes cujas massas não variam com o tempo, então aqui (dm/dt) é igual a zero. Assim $f = (dp/dt) = m (dv/dt) = m a$

Há contudo exemplos de fenômenos em que a massa varia com o tempo como por exemplo um caminhão que vai perdendo areia ao longo do percurso e o do foguete que tendo uma massa de combustível relevante vai perdendo massa considerável ao se mover. Para tais fenômenos temos a necessidade de ir além da fórmula que expressa a força newtoniana como o produto entre a massa pela aceleração sofrida pelo corpo em questão.

Voltemos ao nosso tema central tratado aqui que é o concernente a sistemas mecânicos cujas massas não variam com o tempo.

Como ponto principal da aula criamos a animação abaixo onde o professor deve tornar claro, através de discussão, a presença das três leis de Newton discutidas acima.

Fonte: *print screen* da aplicação no sistema operacional Windows 7

5 DA PERTINÊNCIA DIDÁTICA EM SE APRESENTAR AS LEIS DE NEWTON POR MEIO DE SIMULAÇÃO

Como argumentamos neste trabalho, as simulações computacionais constituem expedientes riquíssimos para que os estudantes e seus professores encontrem melhores e mais eficientes meios para prover tanto a aprendizagem

genuína dos conteúdos abordados bem como de engendrarem nas suas próprias consciências as dimensões histórica e epistemológica do valor de conquistas cognitivas centrais da história do pensamento, a exemplo das leis de Newton. Como nos referimos neste artigo, à luz do que asseverou Lévy acerca da teoria de Aristóteles do ato e potência, os nossos estudantes, de fato, tem enormes potencialidades (potência no sentido aristotélico) e seria um enorme desperdício não aproveitá-las e não convertê-las em ato (no sentido aristotélico também).

A teoria do ato e potência de Aristóteles é também bastante pertinente em um outro sentido bastante próximo do primeiro ao qual já nos referimos. É importante que todos nós, professores e estudantes, tenham consciência que na simulação, a teoria está incorporada no *soft* correspondente. Isto é verdade, e pode ser discutido em sala de aula, pois se constitui em tema relevante e de valor epistemológico. Vejamos como isto se dá:

No experimento de inspiração no PSSC (Physical Science Committee Study), os dois carrinhos, digamos para fixar as ideias, de massas **M** e **3M** interagem entre si através de uma mola supostamente sem peso e sem massa.

Como no estágio inicial - primeiro estágio- os dois carrinhos estão parados em cima da mesa, então as suas velocidades bem como os seus respectivos momentos lineares são, neste primeiro estágio, ambos iguais a zero. O momento linear resultante será evidentemente igual a zero uma vez que o mesmo se constitui na soma vetorial dos respectivos momentos lineares de cada um dos carrinhos.

Em um segundo estágio do experimento pressionamos um carrinho contra o outro e os soltamos com cuidado; neste segundo estágio cada carrinho vai variar o seu respectivo momento linear devido à interação entre os dois carrinhos mediada pela mola; as duas variações respectivamente sofridas pelos carrinhos vão ocorrer durante um mesmo tempo comum δt que corresponde à interação entre os dois carrinhos quando esta é mediada pela mola; quando a mola não conecta mais um carrinho ao outro, então a interação entre os dois carrinhos acaba; é importante que os estudantes compreendam que se trata, neste caso, de uma interação por contato.

O terceiro estágio de nosso experimento tem início no exato instante em que um carrinho não mais interage com o outro, pois a mola não os conecta mais; tendo em vista que acabada a interação cada carrinho adquire uma correspondente velocidade final, então as duas velocidades finais correspondentes podem ser medidas da seguinte maneira: colocamos um anteparo de madeira fixado na

extremidade da mesa a uma distância de X do carrinho de massa $3M$ e outro anteparo de madeira fixo de maneira tal a ficar preso na extremidade oposta da mesa a uma distância $3X$ do carrinho de massa M . Os carrinhos atingem os respectivos anteparos fixos dispostos nas duas extremidades opostas a um mesmo instante, ou seja, simultaneamente, o que se infere da pancada sonora facilmente percebida em uníssono. Ora, se os carrinhos chegam nos dois anteparos extremos ao mesmo tempo ΔT é porque o que percorreu a distância $3X$ tinham uma velocidade três vezes maior do que o carrinho que percorreu a distância X durante o mesmo tempo ΔT . Considerando que o momento linear total do sistema é a soma vetorial dos momentos lineares parciais de cada carrinho, então chegamos à conclusão que o momento linear total do sistema dos dois carrinhos é igual a zero. Assim o momento linear do sistema se conserva pois o seu valor total é o mesmo tanto no estágio inicial (primeiro estágio) quanto no estágio final (terceiro estágio).

É de fundamental importância para a compreensão genuína das leis de Newton que os estudantes não confundam os dois tempos acima aludidos pois eles são radicalmente diferentes. O intervalo de tempo δt se refere ao tempo de interação entre os carrinhos que é exatamente aquele durante o qual os carrinhos interagem entre si através da mola; este tempo δt é comum às variações de momentos lineares sofridas pelos dois carrinhos e somente diz respeito durante o intervalo de tempo no qual a mola os conecta, ou seja, durante o tempo de interação.

Quando a mola não mais os conecta, aí acaba a interação entre os carrinhos. O intervalo de tempo ΔT é somente usado para medir as respectivas velocidades finais adquiridas respectivamente por cada um dos carrinhos quando os mesmos não mais interagem entre si, pois neste estágio a mola não os conecta.

Uma vez tendo consciência desses elementos conceituais, então podemos ver que este experimento contém, além da conservação do momento linear total do sistema interagente dos dois carrinhos em tela, também contém as três leis de Newton. Vejamos como.

A terceira lei de Newton, a famosa lei da ação e da reação, somente tem lugar quando os carrinhos interagem entre si por meio da mola durante o tempo comum δt . Como as forças newtonianas significam variações do momento linear no tempo, então as variações respectivas de momentos lineares de cada carrinho durante o tempo δt são iguais em módulo e opostas em direção. Aí então vale a terceira lei de

Newton. Outrossim, tal como vimos, cada uma dessas forças se referem à definição de força; logo, vale a assim chamada segunda lei de Newton. A primeira lei de Newton se verifica tão logo acaba a interação entre os carrinhos. O carrinho de massa $3M$ se desloca em linha reta durante o tempo ΔT até atingir o anteparo com uma velocidade três vezes menor que a velocidade com a qual o carrinho de massa M atinge o anteparo na extremidade oposta.

É importante afirmar que o soft, no qual a simulação é realizada, já incorpora de antemão a teoria newtoniana tanto quanto o experimento da interação entre os dois carrinhos na mesa de laboratório o incorpora diretamente quando o mesmo é analisado à luz do referencial teórico newtoniano. Deste modo, pelo menos neste caso, as realidades, direta e virtual, se equivalem e ambas podem ser utilizadas em sala de aula. Acontece que os experimentos virtuais tem bem mais mobilidade, pois podem dispensar aparatos pesados. O laboratório virtual é uma possibilidade em várias situações de ensino, mas não em todas. O recomendável é que o professor e seus estudantes sejam suficientemente versáteis para adotar os dois expedientes de aprendizagem, principalmente em um mundo de grandes potencialidades dos experimentos virtuais. O professor deve exercer a sua criatividade bem como a sua autonomia intelectual, enquanto professor, para fazer escolhas judiciosas nas diversas situações de ensino com as quais se confronta.

6. DAS VANTAGENS DA DISCUSSÃO PROPICIADA PELOS EXPERIMENTOS DE LAVRAS, RESPECTIVAMENTE, VIRTUAL E REAL.

Duas observações nos movem nesta seção.

A primeira delas é que tanto na forma do experimento em cima da mesa de laboratório que chamaremos, com uma certa flexibilidade notacional, de real, quanto na forma do experimento virtual propriamente dito, os conceitos intervenientes se mostram transparentes. Vejamos que no que concerne à terceira lei de Newton, ambos os experimentos, real e virtual, mostram com a suficiente clareza que a ação e a reação necessariamente agem em corpos distintos e nunca em um mesmo corpo, pois senão não seria uma interação a dois corpos. Assim a ação que age sobre um carrinho é exatamente igual, em módulo, à reação exercida sobre o outro. Isso não se dá com transparência no caso em que o professor dá um soco na parede e diz que a parede reagiu. Ora, de fato a parede reage, mas não é

transparentemente didático que a parede também exerce uma reação sobre a mão do professor. O professor apenas sentirá dor na mão e além dessa dor ser um sofrimento inútil, ela não é um expediente didático de boa qualidade. Diversamente desse infeliz soco, no caso dos carrinhos, isto se dá de maneira transparente na discussão e nos experimentos, ambos, real e virtual.

A segunda observação é de lavra histórica. Newton foi bastante além das interações de contacto como a que examinamos no caso dos dois carrinhos que interagem por contacto com a mediação da mola. Newton disse que a ação e a reação valem para a interação entre o Sol e a Terra, entre o Sol e Saturno e enfim entre quaisquer corpos massivos separados espacialmente entre si. Trata-se da ação instantânea a distância de que trata a sua Gravitação Universal.

7 DO MISTER PRÓPRIO DO PROFESSOR: O RECOMENDÁVEL ENGAJAMENTO NO COMBATE AO MITO DA GENIALIDADE

Os objetivos compreendidos no mister do Professor são vários e não se limitam exclusivamente aos conteúdos específicos concernentes às suas disciplinas científicas no sentido estrito do termo. Em outras palavras, cabe também ao Professor, além de ventilar competentemente os teores específicos que lhe dizem respeito, também o mister de exercer liderança proativa no sentido de dar exemplo aos seus estudantes de bons valores éticos, de boas atitudes perante o conhecimento e perante às pessoas bem como de adotar bons procedimentos em prol tanto de uma boa educação científica quanto de uma sociedade saudável na qual se insere. Neste sentido, tecemos comentários na seção 3 sobre a Lenda da Maçã de Newton no sentido de sugerir o que isso poderia significar em termos de um mito que se constituiria em obstáculo que distorce a percepção da natureza da ciência, ou seja, da natureza do proceder científico. É importante que os estudantes tenham em mente que algo que contém uma intuição tão profunda como a proposta de uma lei universal que tenha validade universal, ou seja, tenha validade para quaisquer interações entre quaisquer corpos massivos do universo, não poderia jamais ocorrer da maneira folclórica como a expressa na famosa anedota. Além de distorcer a percepção adequada da natureza da ciência, a anedota contém de maneira subjacente, e às vezes até de maneira explícita, uma certa intimidação contida na mensagem, quer subliminar quer ostensiva, de que gênios são gênios e

podem tudo, mas nós somos simples mortais limitadíssimos etc. e tal. É recomendável, e os documentos oficiais mais recentes recorrentemente assim reiteram, que os sujeitos da educação não sejam intimidados, enquanto sujeitos do conhecimento, por esses mitos a ponto de que esses venham a exercer um peso sobre o desabrochar de suas potencialidades cognitivas e se convertam em obstáculos às suas conquistas de autonomia intelectual. Logo, a supervalorização de gênios, o que não significa o reconhecimento de singularidades importantes na história das ciências, não faz bem aos jovens estudantes que precisam se afirmar de maneira coerente com as suas potencialidades e assim, não devem ser desestimulados a procurá-las e desenvolvê-las.

A questão do momento da queda da maçã no sentido do insight abduativo de Peirce não pode ser vista como algo que nem implique mistificação nem que implique mitificação, pois somente tem insights tão gloriosos quem muito e longamente refletiu sobre o tema e sobre temas correlatos. Logo, o próprio insight não é para ser mitificado e sim para ser contextualizado, pois seria impossível alguém concebê-lo a partir de coisa nenhuma prévia. Neste sentido, exploramos também nas seções 3 e 7 a Lenda da Queda da Maça de Newton, tal como é comumente concebida, como um obstáculo à compreensão da natureza da ciência e também um obstáculo ao livre desenvolvimento das autonomias dos estudantes diante da potencial intimidação causada pelo 'efeito gênio'.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Somos conduzidos neste trabalho às nossas considerações finais. O nosso objetivo neste trabalho foi o de explorar as possibilidades cognitivas e de aprendizagem que podem ser propiciadas por experimentos virtuais (objetos de aprendizagem). Tanto os experimentos chamados de reais quanto os experimentos assim chamados de virtuais carregam no seu bojo, teorias e assim, revela-se transparente que não há algo que possamos falar sobre algum assunto, sem que de antemão alguns referenciais teóricos já se encontrem incorporados nas declarações que daí advenham. Elegemos as leis de Newton como exemplo. Estendemos as nossas considerações para situações de ensino em que o mister do Professor se revela como de amplo espectro, não estando reduzido apenas às considerações de

suas disciplinas específicas no sentido estrito do termo. Valores, atitudes e procedimentos são essenciais para o exercício, a pleno título, das atividades de um bom Professor. Neste sentido, exploramos também nas seções 3 e 7 a Lenda da Queda da Maçã de Newton, tal como é comumente concebida, como um obstáculo à compreensão da natureza da ciência e que também se constitui em um obstáculo ao livre desenvolvimento das autonomias dos estudantes diante da potencial intimidação causada pelo 'efeito gênio'.

REFERÊNCIAS

CANALLE, João Batista Garcia; MOURA, Rodrigo; **Os Mitos dos Cientistas e suas Controvérsias**; Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 23, no. 2, Junho, 2001

LÉVY, P.. **O que é o virtual?**. Trad. Paulo Neves. 2. ed. São Paulo: Ed. 34, 2011.

_____ **As tecnologias da inteligência: o futuro do pensamento na era da informática**. Trad. de Carlos Irineu da Costa. 2. ed. Rio de Janeiro: Ed. 34, 2011.

Microsoft, **Office**. Disponível em < <http://office.microsoft.com/pt-br/novice/o-que-e-o-powerpoint-HA010265950.aspx> >. Acesso em 08 de Julho de 2012.

NEWTON, Isaac, **Princípios Matemáticos**, Coleção Os Pensadores; 2. ed. São Paulo: Abril Cultural, 1983.

SILVA, Cibelle Celestino, **Estudo de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino**; São Paulo; Livraria da Física, 2006.

APÊNDICE B

SEQUENCIA DIDÁTICA E MODELAGENS COMPUTACIONAIS



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS - UFAL
CENTRO DE EDUCAÇÃO - CEDU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE CIÊNCIAS E
MATEMÁTICA – PPGE CIM**

EDSON SANTOS JÚNIOR

**PRODUTO EDUCACIONAL
SEQUÊNCIA DIDÁTICA:
SIMULAÇÕES E MODELAGENS EM POWER POINT E MODELLUS COMO
OBJETOS VIRTUAIS DE APRENDIZAGEM PARA AUXILIAR A APRENDIZAGEM
DA UNIFICAÇÃO DA FÍSICA DE GALILEU COM A ASTRONOMIA DE KEPLER
NA GRAVITAÇÃO UNIVERSAL NEWTON**

**MACEIÓ-AL
2016**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS - UFAL
CENTRO DE EDUCAÇÃO - CEDU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE CIÊNCIAS E MATEMÁTICA
– PPGEICIM**

**A UNIFICAÇÃO NEWTONIANA APRESENTADA MEDIANTE OBJETOS
VIRTUAIS DE APRENDIZAGEM**

Produto educacional apresentado à banca examinadora do Programa de Pós-graduação em Ensino de Ciências e Matemática da Universidade Federal de Alagoas como exigência parcial para a obtenção do título de mestre, sob orientação do Prof. Dr. Jenner Barretto Bastos Filho.

**MACEIÓ-AL
2016**

1 APRESENTAÇÃO

Neste trabalho, apresenta-se um produto educacional baseado em simulações computacionais em Power Point e em modelagens computacionais no software Modellus, sendo as primeiras relativas a aplicações das três leis de Newton e as demais relativas aos problemas da queda livre de uma maçã, do lançamento vertical para cima de uma esfera, da descida de um plano inclinado por uma esfera e do movimento de translação da Lua em torno da Terra. Apresenta-se, ainda, um roteiro de aplicação das mesmas durante um número que consideramos adequado de aulas, para estudantes do 1º ano do Ensino Médio e da disciplina Física 01 do Ensino Superior, objetivando a assimilação de conceitos relacionados à Física de Galileu, à Astronomia de Kepler e à Gravitação Universal de Newton, com ênfase na crítica à indução de Popper, com embasamento na teoria dos Modelos Mentais na abordagem de Johnson-Laird. O produto educacional é constituído pelo texto de apoio, pelas simulações computacionais, pelas modelagens computacionais e por uma sequência didática de aplicação dos mesmos, por meio dos quais professor e os estudantes irão se utilizar de uma reconstrução teórica do caso da Unificação, com acompanhamento do professor, sendo o referido texto o capítulo 2 da dissertação apresentada e o roteiro de construção, exposição e discussão das simulações e modelagens que o professor deverá usar para construir, expor e discutir as simulação e modelagens computacionais. Busca-se, com esta sequência, propiciar aos estudantes uma forma eficiente de construção dos seus modelos mentais acerca dos conceitos aqui pretendidos, tendo como fundamento a teoria dos Modelos Mentais de Johnson-Laird e a caracterização de Wiley sobre os Objetos Virtuais de Aprendizagem.

2 INTRODUÇÃO

Essa sequência didática foi desenvolvida para alunos do 1º ano do Ensino Médio e da disciplina Física 01 do Ensino Superior. O conteúdo a ser desenvolvido nela diz respeito à Física de Galileu, à Astronomia de Kepler e à Gravitação Universal de Newton, com ênfase na crítica à indução de Popper, que é relativamente complexa em seus aspectos epistemológicos, porém, é de considerável relevância que os estudantes percebam o processo de construção do conhecimento, da quebra de paradigmas e do surgimento de mitos como o da queda da maçã, além dos conceitos físicos aqui tratados. A sequência, assim como seus elementos constituintes, tem como objetivo: despertar o interesse dos estudantes pela Física relacionada aos conceitos tratados e promover uma aprendizagem eficiente enquanto construção dos modelos mentais de modelos conceituais por parte dos estudantes através da interação, com os estudantes, a respeito da Unificação da Física de Galileu com a Astronomia de Kepler na construção da Gravitação Universal à luz da crítica popperiana à indução.

A estruturação da sequência no processo de construção das aulas utiliza simulações computacionais em Power Point e modelagens computacionais no software Modellus, constituídas pela simulação da interação de dois blocos através de uma mola helicoidal, da queda livre de uma maçã, do lançamento vertical para cima de uma esfera, da descida de um plano inclinado por parte de uma esfera e do movimento de translação da Lua em torno da Terra.

A utilização dessas simulações computacionais mediada pelo docente pode propiciar a construção de modelos mentais adequados por parte do aluno, acerca dos fenômenos tratados.

3 PÚBLICO ALVO

Essa atividade deve ser realizada em turmas do 1º ano do Ensino Médio e da disciplina Física 01 do Ensino Superior.

4 NÚMERO DE AULAS

Essa sequência didática foi elaborada para ser aplicada em 6 aulas de 50 minutos cada, divididas em blocos de 2 aulas juntas.

5 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As sequências didáticas são um, “Conjunto de atividades, estratégias e intervenções planejadas etapa por etapa pelo docente para que o entendimento do conteúdo ou tema proposto seja alcançado pelos discentes” (KOBASHIGAWA et al., 2008).

Apesar da sequência didática assemelhar-se a um plano de aula, ela diferencia-se deste último por ser de maior amplitude em tempo de aplicação, estratégias escolhidas e conteúdos a serem abordados. Das etapas comuns a um plano de aula, temos na sequência didática a necessidade de um objetivo, de materiais a serem usados e avaliações a serem aplicadas.

No Brasil as sequências didáticas surgem nos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) como projetos e atividades sequenciadas e como forma de evitar a ação, considerada imprudente, de selecionar e aplicar atividades soltas durante a aula, pois, “tem sido proposto um trabalho para evidenciar as “seqüências didáticas/conceituais” das atividades do *Guia do Formador* e suas relações internas dentro de cada módulo. Neste esforço, foi organizada uma síntese das finalidades das atividades...”.(MEC, 2002, p. 13).

É fácil perceber que as sequências didáticas são formas de planejamento de aula que possibilitam a otimização organizacional das atividades trabalhadas, uma vez que, “sequências didáticas, são uma maneira de encadear e articular as diferentes atividades ao longo de uma unidade didática”. (Zabala, 1998, p.20).

Ainda, segundo o mesmo autor, em uma sequência didática, além do planejamento, é necessário avaliar, sendo este elemento que não deve ser separado

daquela, ou seja, “O planejamento e a avaliação dos processos educacionais são uma parte inseparável da atuação docente”. (Zabala,1998, p.17).

6 A SEQUENCIA DIDÁTICA

6.1 TEMA:

A Unificação Newtoniana apresentada mediante Objetos Virtuais de Aprendizagem

6.2 OBJETIVO GERAL:

O objetivo geral deste trabalho é proporcionar uma aprendizagem eficiente dos conceitos envolvidos no caso da Unificação da Física de Galileu com a Astronomia de Kepler através da Gravitação Universal de Newton.

6.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- I. Discutir o processo abduutivo no episódio da unificação da Física de Galileu com a Astronomia de Kepler na construção da Gravitação Universal realizada por Newton.
- II. Possibilitar ao estudante construir modelos mentais compatíveis com os modelos conceituais.
- III. Possibilitar ao estudante compreender os conceitos físicos e realizar aplicações dos mesmos em modelagens computacionais.

6.4 ETAPAS:

1º Momento: o docente deverá apresentar e discutir o texto da reconstrução teórica do caso da Unificação da Física de Galileu com a Astronomia de Kepler na Gravitação Universal (3 aulas); também deverá refazer as deduções sempre que a interação com os estudantes determinar essa necessidade;

2º Momento: o docente deve construir, apresentar e discutir as simulações computacionais em Power Point, apresentadas no artigo em anexo (1 aula);

3º Momento: o docente deve apresentar e alterar as modelagens abaixo descritas, de acordo com o sugerido na discussão com os estudantes (1 aula);

4º Momento: o docente deve elaborar uma avaliação, em uníssono com os conceitos abordados e aplica-la aos estudantes para verificar a aprendizagem obtida pelos mesmos (1 aula).

7 CONTRUÇÃO DAS MODELAGENS COMPUTACIONAIS

7.1 CONFIGURAÇÃO

Para a construção das modelagens computacionais utilizamos o software Modellus em um computador com processador intel centrino 2 com memória de 9GB, em um sistema operacional Windows Seven Ultimate 64 bits. Porém, um computador com processador Celeron de 2.5GHz e memória de 2GB, mas sabemos ser possível rodar o programa Modellus. A versão do programa que utilizamos foi o Modellus X 0.4.05.

Produzimos um tutorial mostrando cada passo para a instalação do software e para a criação de modelagens simples e capazes de atender ao nosso propósito.

7.2 COMO OBTER E INSTALAR O PROGRAMA

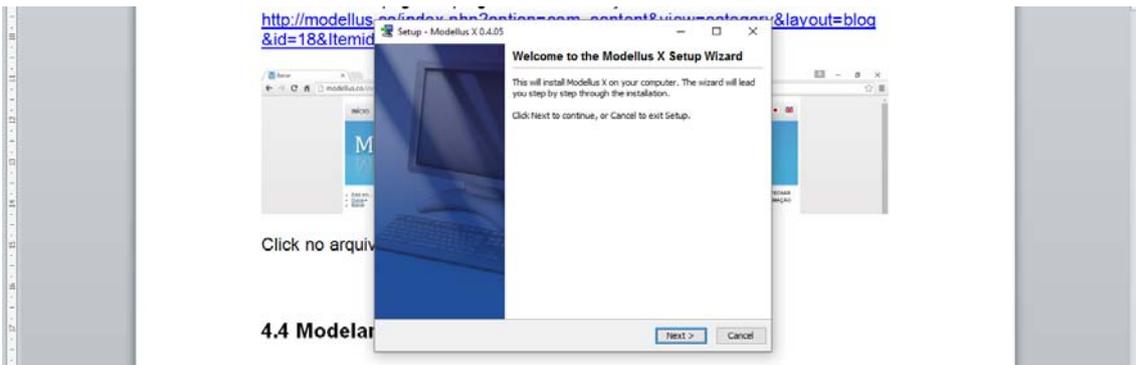
Acesse a homepage do programa no endereço http://modellus.co/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=18&Itemid=114&lang=pt
Fonte: print screen da aplicação, criada pelo autor, no sistema operacional Windows 7.ption=com_content&view=category&layout=blog&id=18&Itemid=114&lang=pt, click em “Baixar”



Fonte: *print screen* da aplicação, criada pelo autor, no sistema operacional Windows 7.

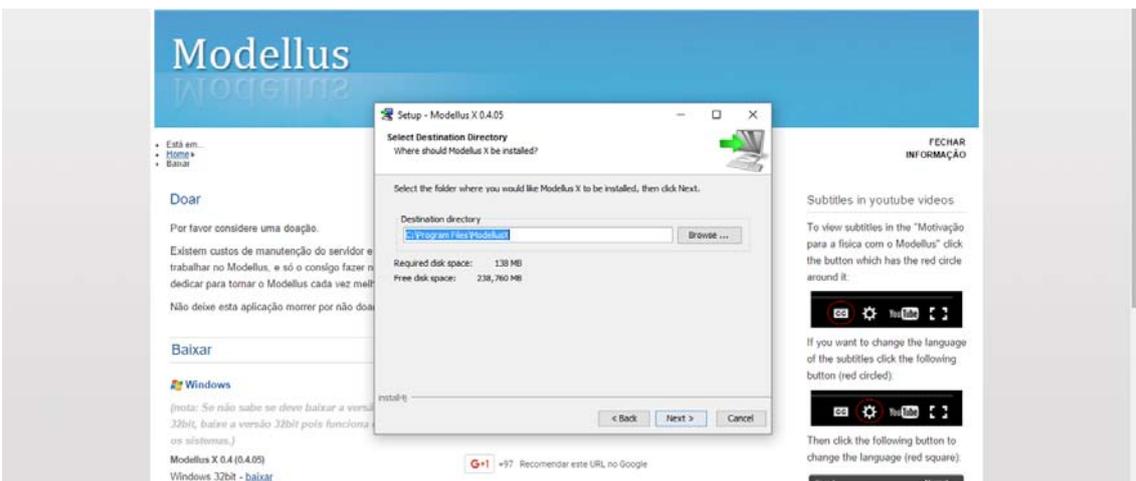
1 - Clique no arquivo executável e espere a instalação ser executada;

2 - Clique em prosseguir;



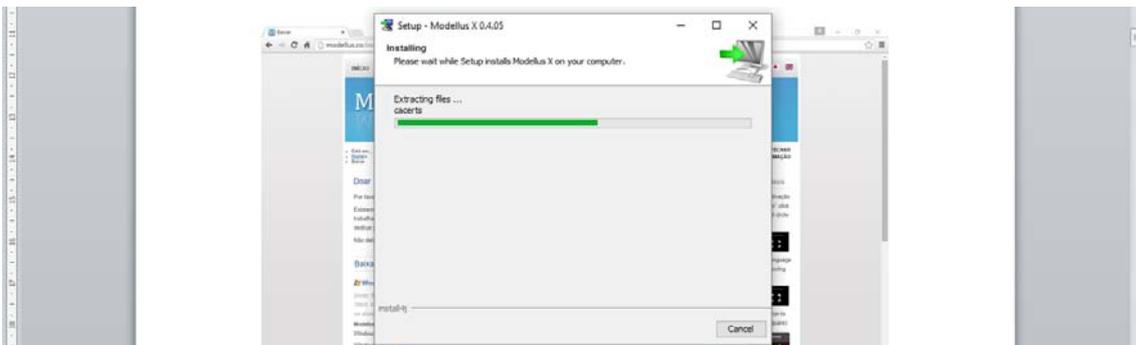
Fonte: *print screen* da aplicação, criada pelo autor, no sistema operacional Windows 7.

3 - Escolha o local a ser instalado;



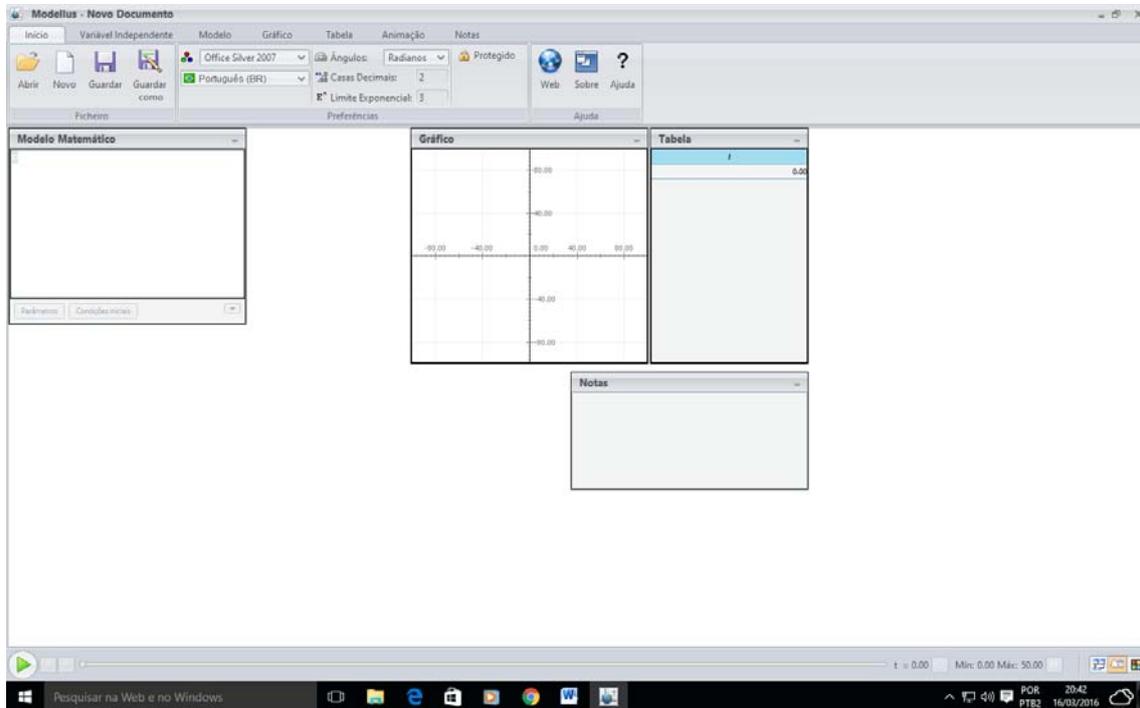
Fonte: *print screen* da aplicação, criada pelo autor, no sistema operacional Windows 7.

4 - Os arquivos serão extraídos e a instalação será executada;



Fonte: *print screen* da aplicação, criada pelo autor, no sistema operacional Windows 7.

5 - Clique no ícone da área de trabalho e abra o programa;



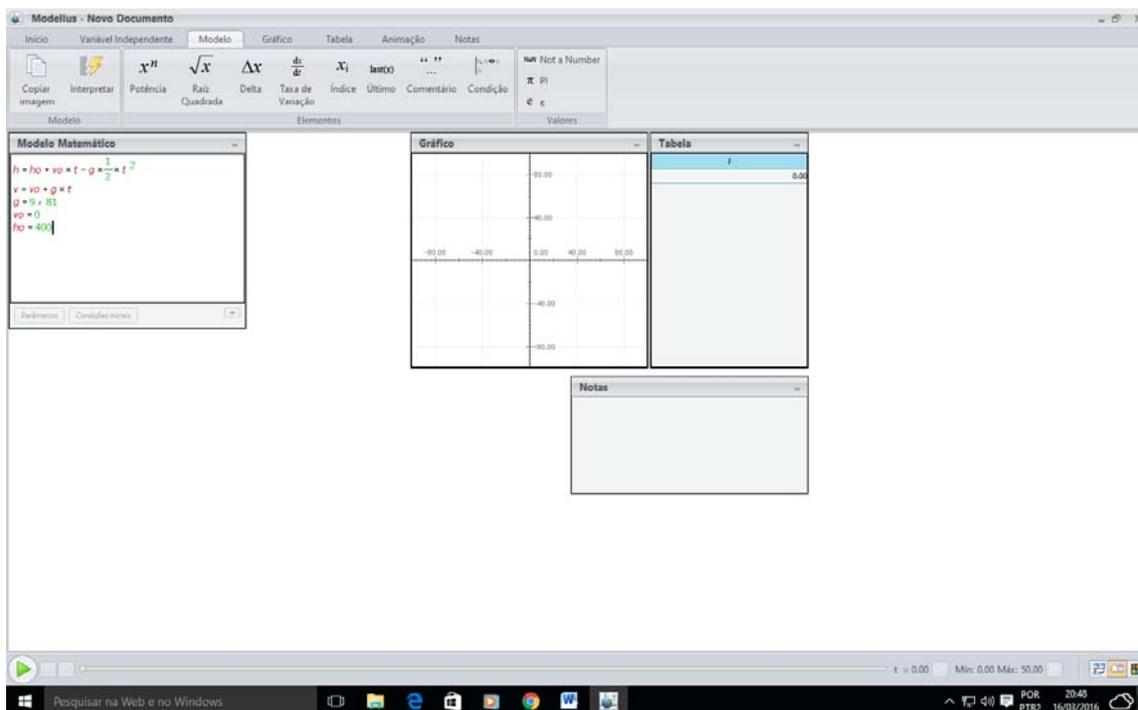
Fonte: *print screen* da aplicação, criada pelo autor, no sistema operacional Windows 7.

6 - O programa está pronto para ser utilizado.

7.3 MODELANDO A QUEDA LIVRE.

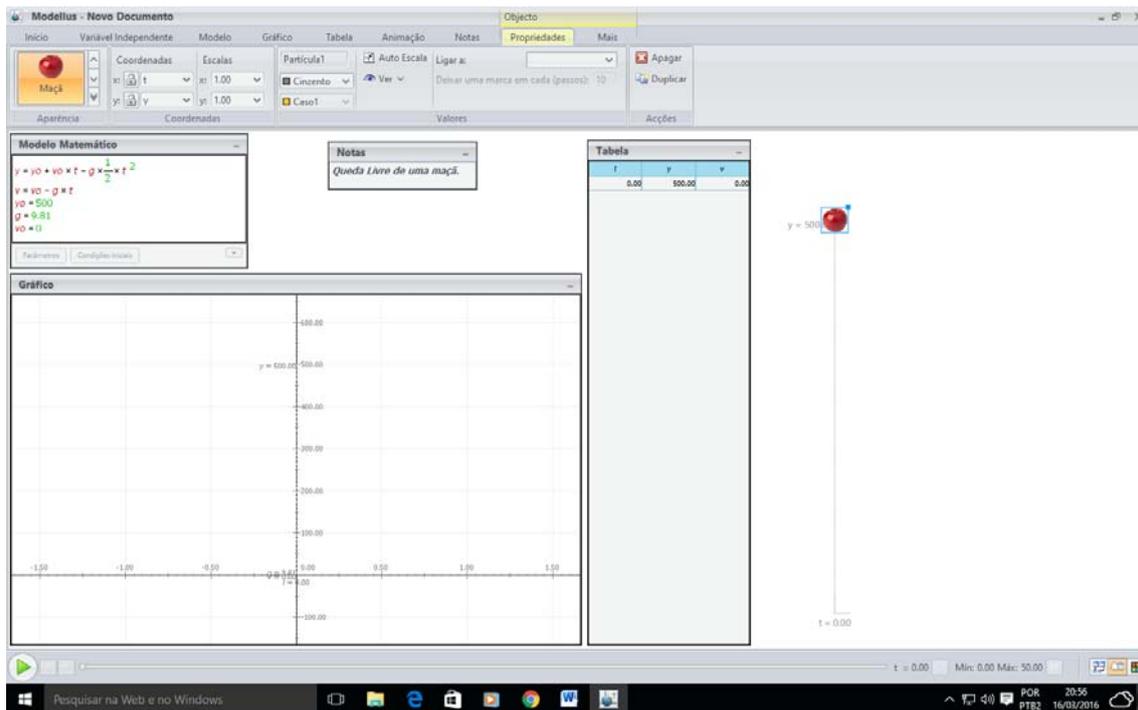
7.3.1 Sequencia para a construção dessa modelagem:

1-Digitar as equações cinemáticas, da posição e da velocidade, que descrevem a queda livre, como também os valores da altura inicial, da gravidade e da velocidade inicial;



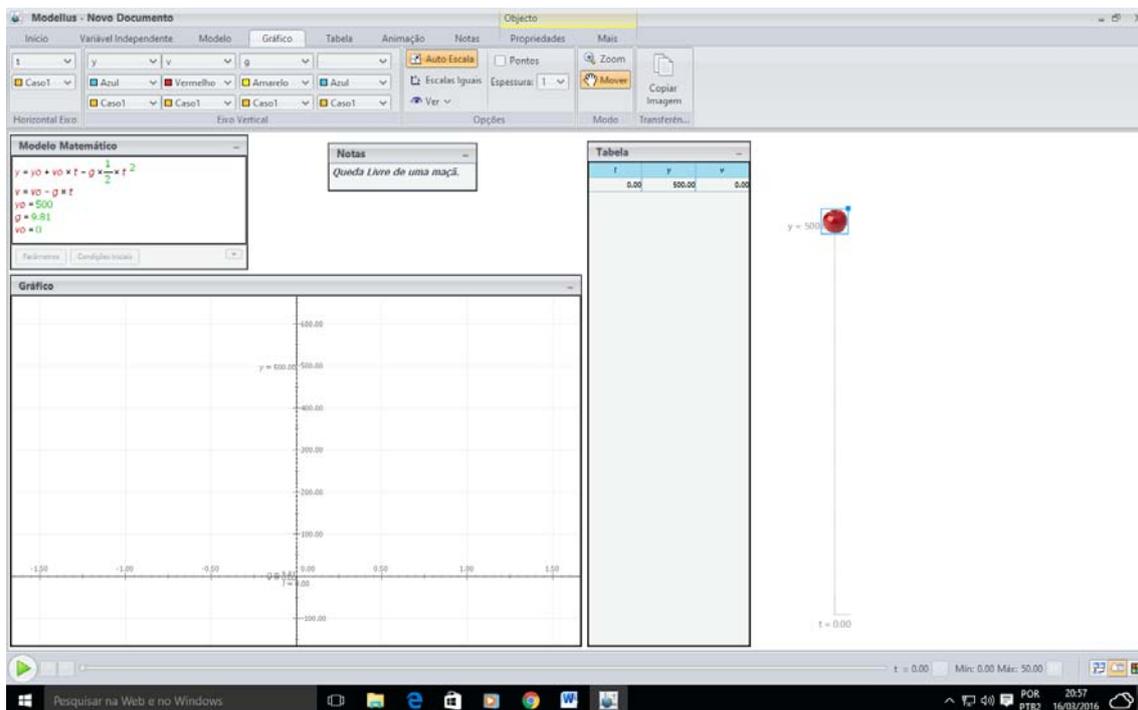
Fonte: *print screen* da aplicação, criada pelo autor, no sistema operacional Windows 7.

- 2-Mandar interpretar o modelo matemático e corrigi-lo até que o sistema exiba a mensagem de "ok";
- 3-Ir para a sessão de animação e escolher a partícula que executará o descrito no modelo matemático;
- 4-Após a seleção da partícula escolher qual variável estará representada em x e qual estará representada em y, no caso em questão $x=t$ e $y=y$ ou h

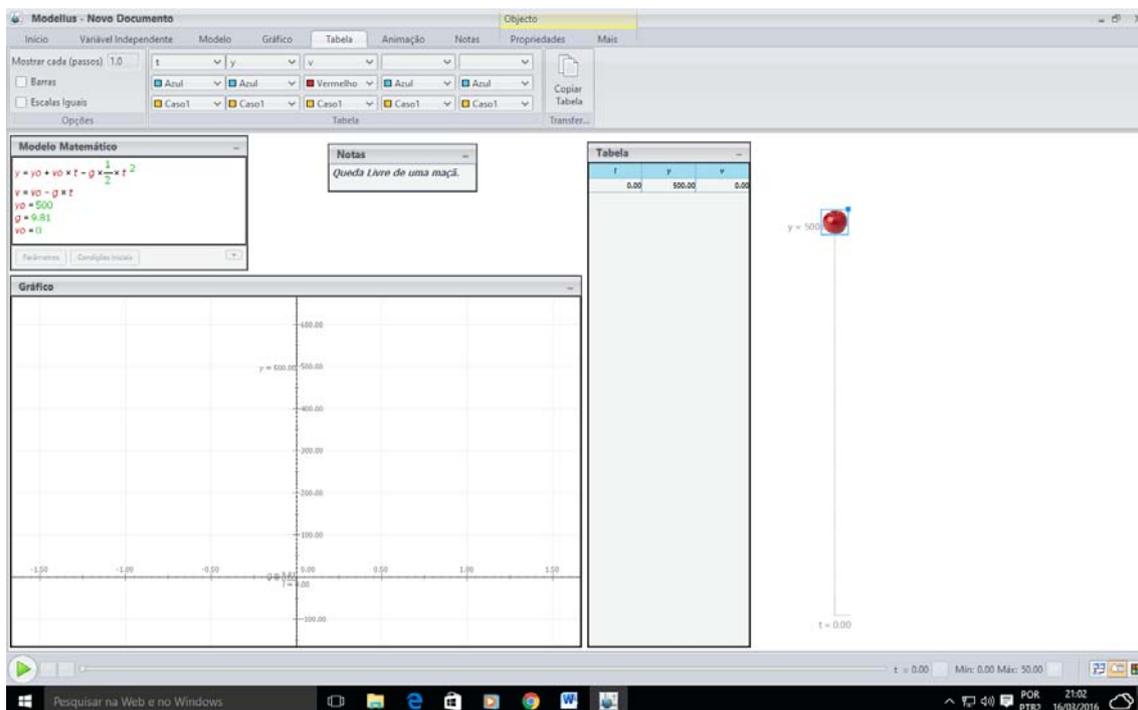


Fonte: *print screen* da aplicação, criada pelo autor, no sistema operacional Windows 7.

5-Escolher as variáveis cujos comportamentos serão descritos no gráfico e na tabela, para tanto, se seleciona as sessões gráfico e tabela e efetuam-se as escolhas de variáveis e cores das curvas.



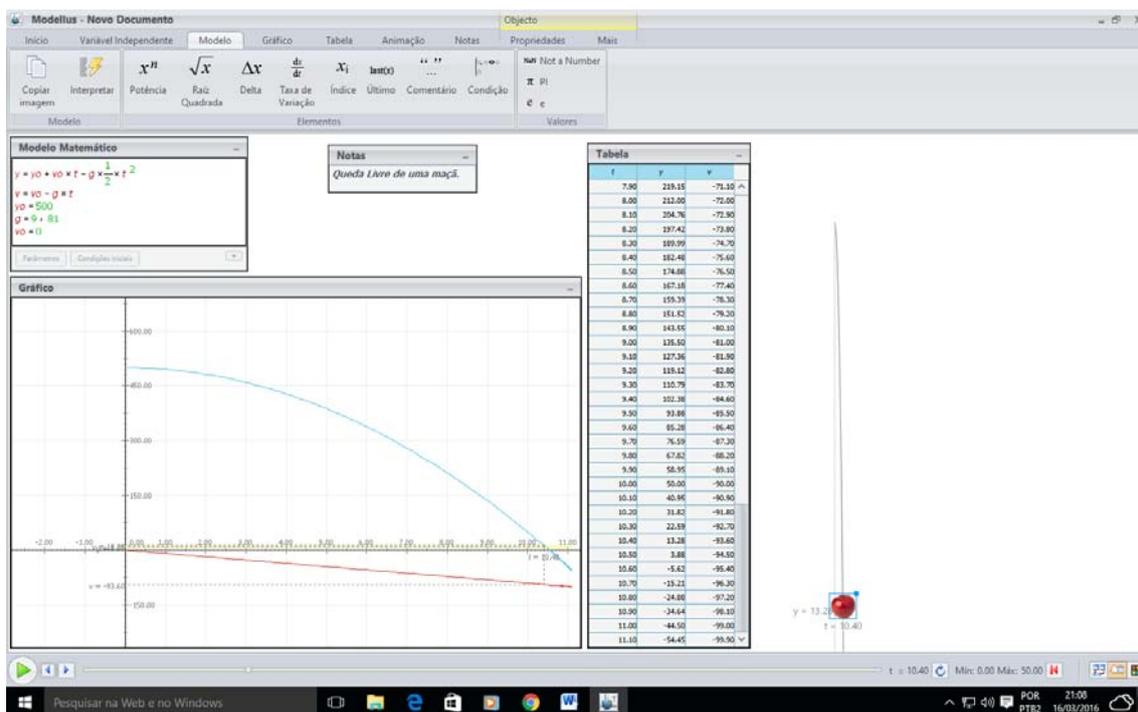
Fonte: *print screen* da aplicação, criada pelo autor, no sistema operacional Windows 7.



Fonte: *print screen* da aplicação, criada pelo autor, no sistema operacional Windows 7.

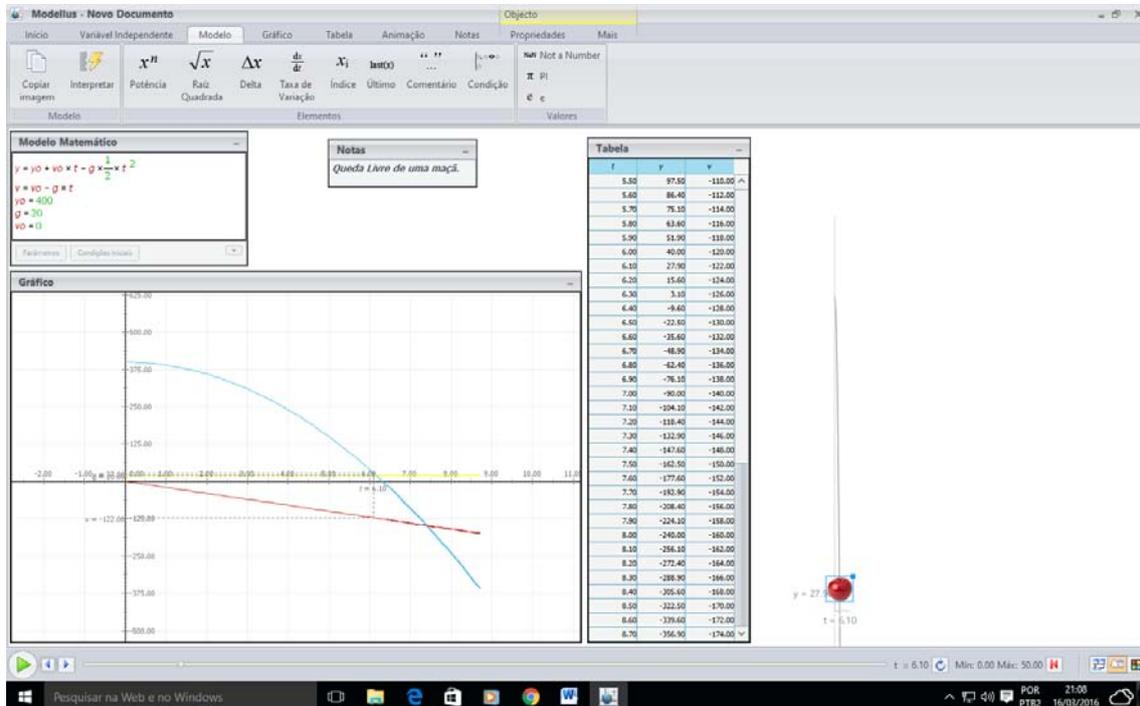
6-Finalmente, nossa modelagem está pronta para ser rodada.

Ao rodar a modelagem, teremos o movimento simulado pelo objeto escolhido para o mesmo, a tabela será alimentada pelos valores, as curvas gráficas serão construídas e tudo ocorrerá de maneira simultânea.



Fonte: *print screen* da aplicação, criada pelo autor, no sistema operacional Windows 7.

É importante observar que os valores podem ser alterados a qualquer momento e a simulação reiniciada como mostrado abaixo.

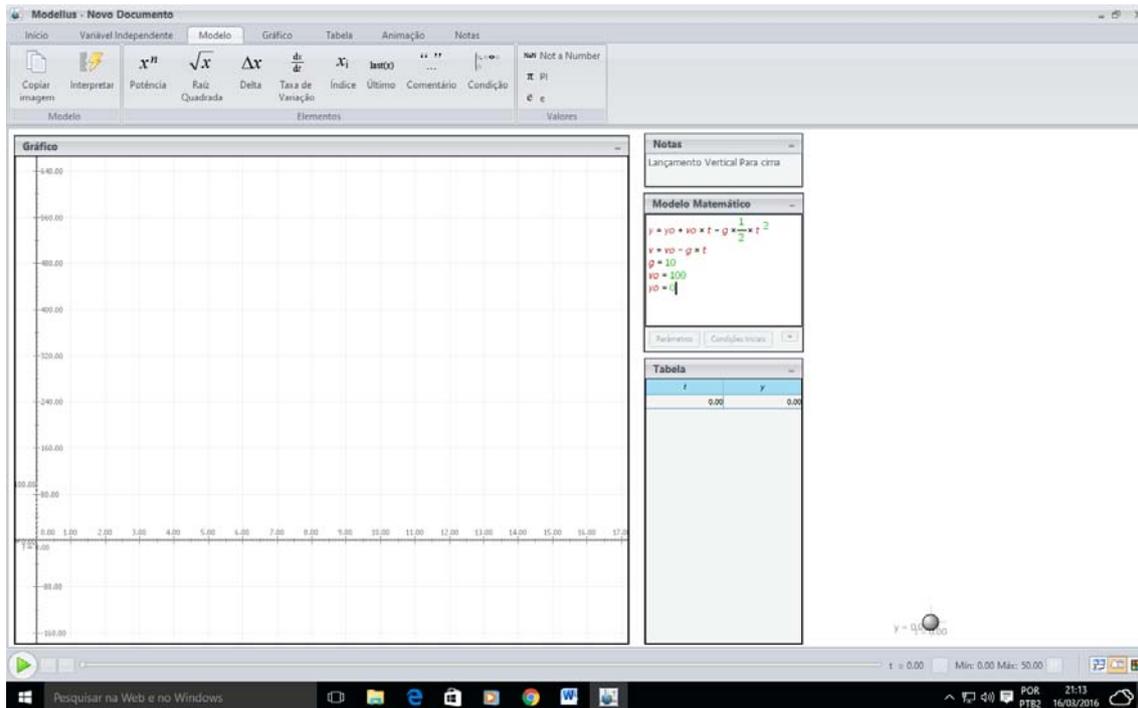


Fonte: *print screen* da aplicação, criada pelo autor, no sistema operacional Windows 7.

7.4 LANÇAMENTO VERTICAL PARA CIMA

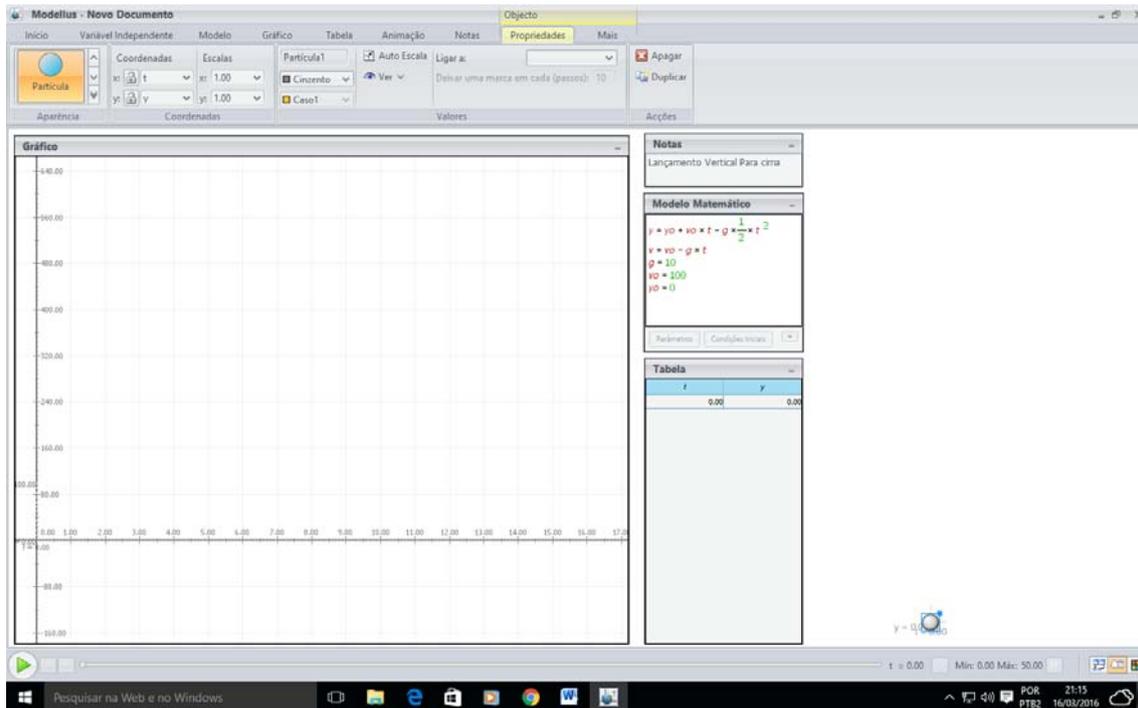
7.4.1 Sequencia para a construção dessa modelagem

1-Digitar as equações cinemáticas, da posição e da velocidade, que descrevem o lançamento vertical para cima, como também os valores da altura inicial, da gravidade e da velocidade inicial;



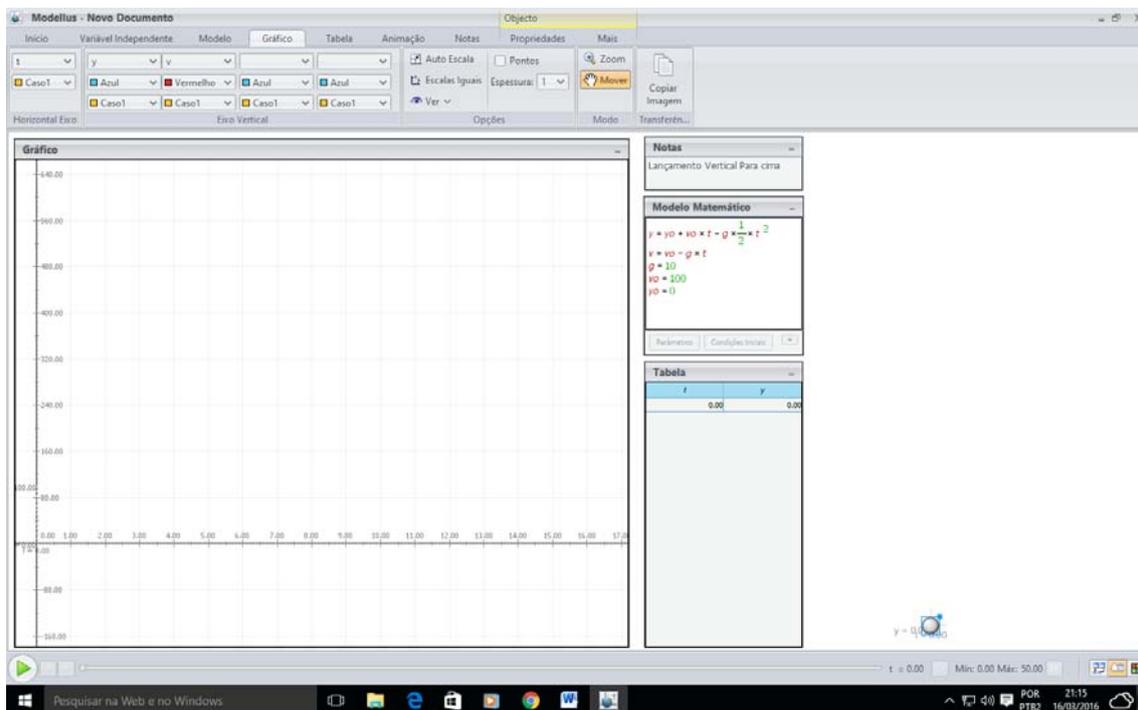
Fonte: *print screen* da aplicação, criada pelo autor, no sistema operacional Windows 7.

- 2-Mandar interpretar o modelo matemático e corrigi-lo até que o sistema exiba a mensagem de "ok";
- 3-Ir para a sessão de animação e escolher a partícula que executará o descrito no modelo matemático;
- 4-Após a seleção da partícula escolher qual variável estará representada em x e qual estará representada em y, no caso em questão $x=t$ e $y=y$ ou h

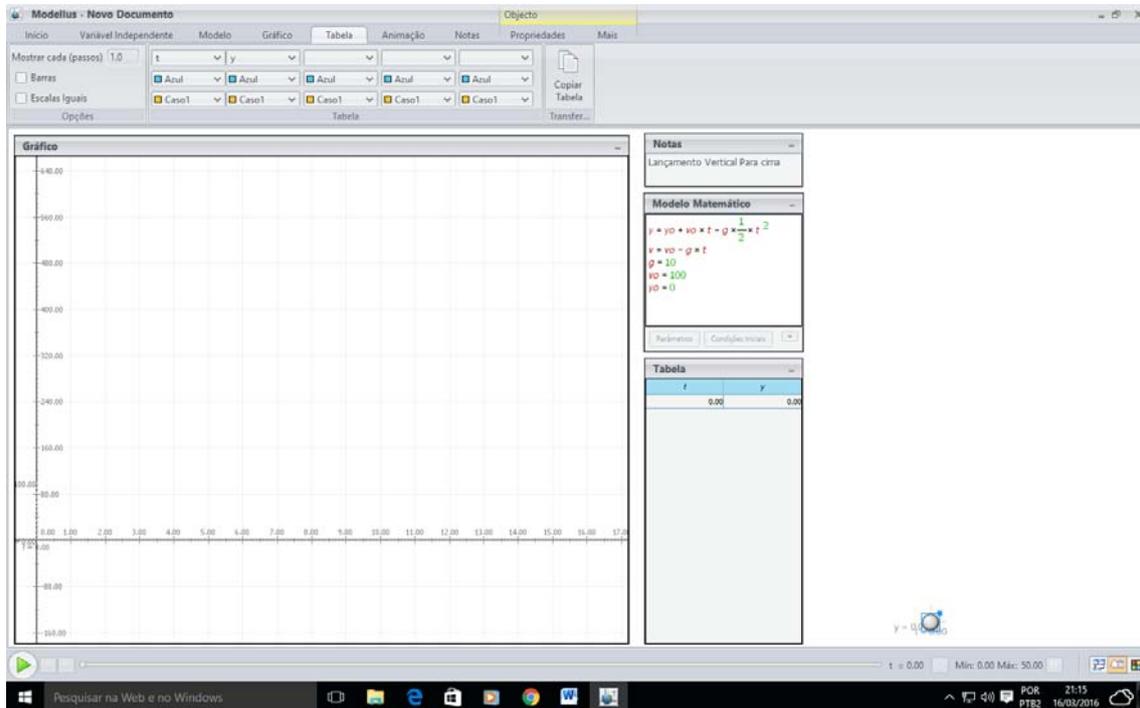


Fonte: *print screen* da aplicação, criada pelo autor, no sistema operacional Windows 7.

5-Escolher as variáveis cujos comportamentos serão descritos no gráfico e na tabela, para tanto se seleciona as sessões gráfico e tabela e efetuam-se as escolhas de variáveis e cores das curvas



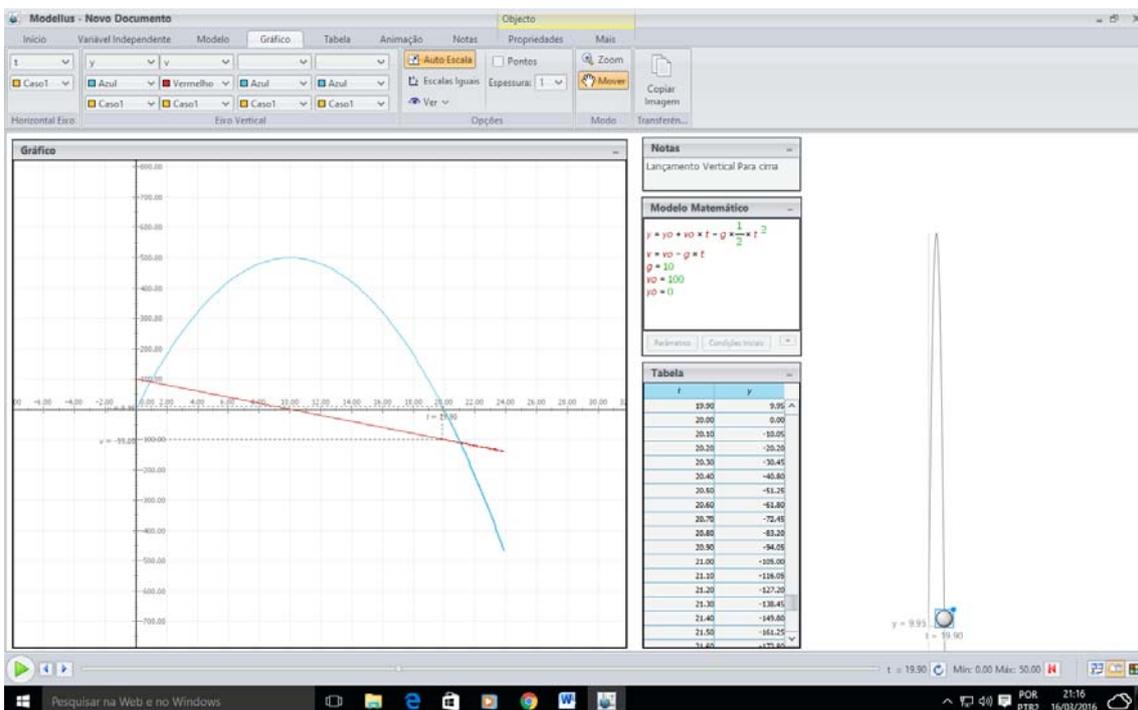
Fonte: *print screen* da aplicação, criada pelo autor, no sistema operacional Windows 7.



Fonte: *print screen* da aplicação, criada pelo autor, no sistema operacional Windows 7.

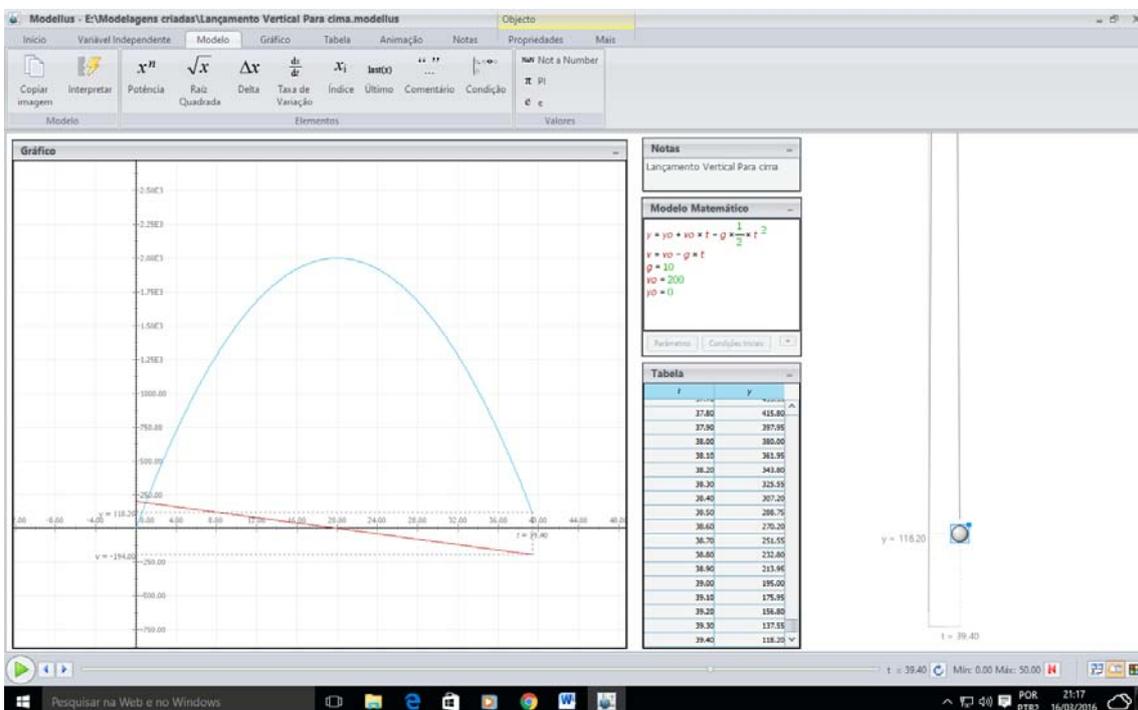
6-Finalmente, nossa modelagem está pronta pra ser rodada.

Ao rodar a modelagem, teremos o movimento simulado pelo objeto escolhido para o mesmo, a tabela será alimentada pelos valores, as curvas gráficas serão construídas e tudo ocorrerá de maneira simultânea.



Fonte: *print screen* da aplicação, criada pelo autor, no sistema operacional Windows 7.

É importante observar que os valores podem ser alterados a qualquer momento e a simulação reiniciada como mostrado abaixo.

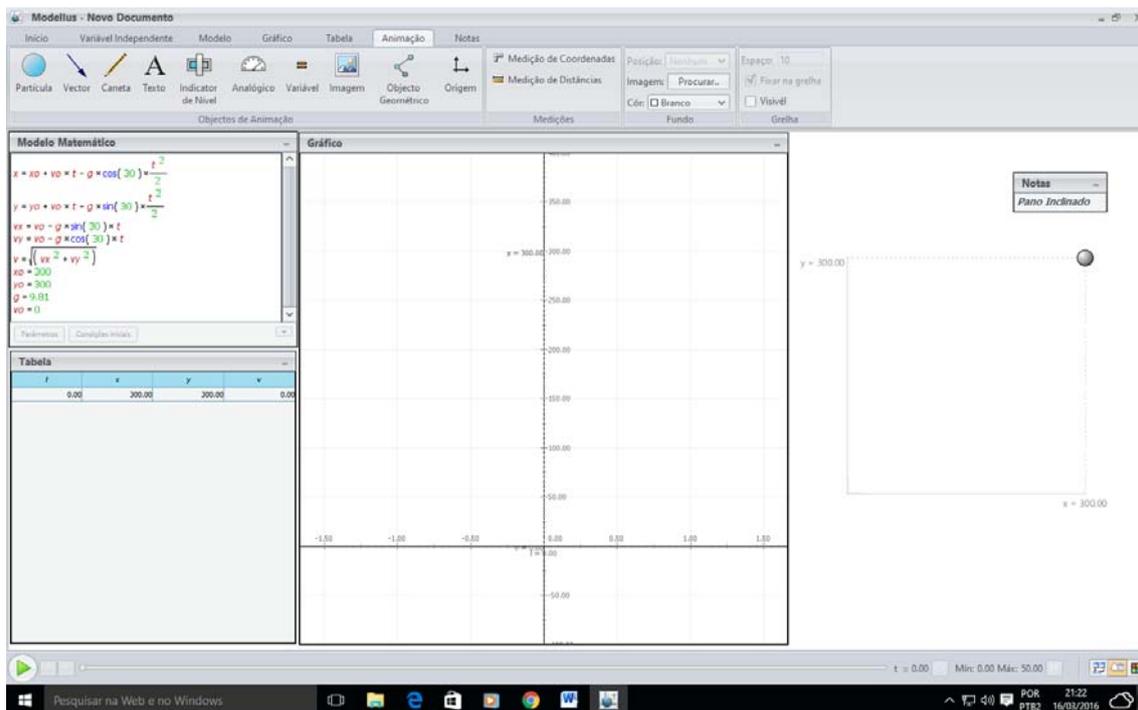


Fonte: *print screen* da aplicação, criada pelo autor, no sistema operacional Windows 7.

7.5 PLANO INCLINADO

7.5.1 Sequencia para a construção dessa modelagem

1-Digitar as equações cinemáticas, da posição e da velocidade nos eixos x e y, que descrevem o movimento de um corpo em um plano inclinado, como também os valores iniciais da altura em ambos os eixos, da gravidade e da velocidade inicial;



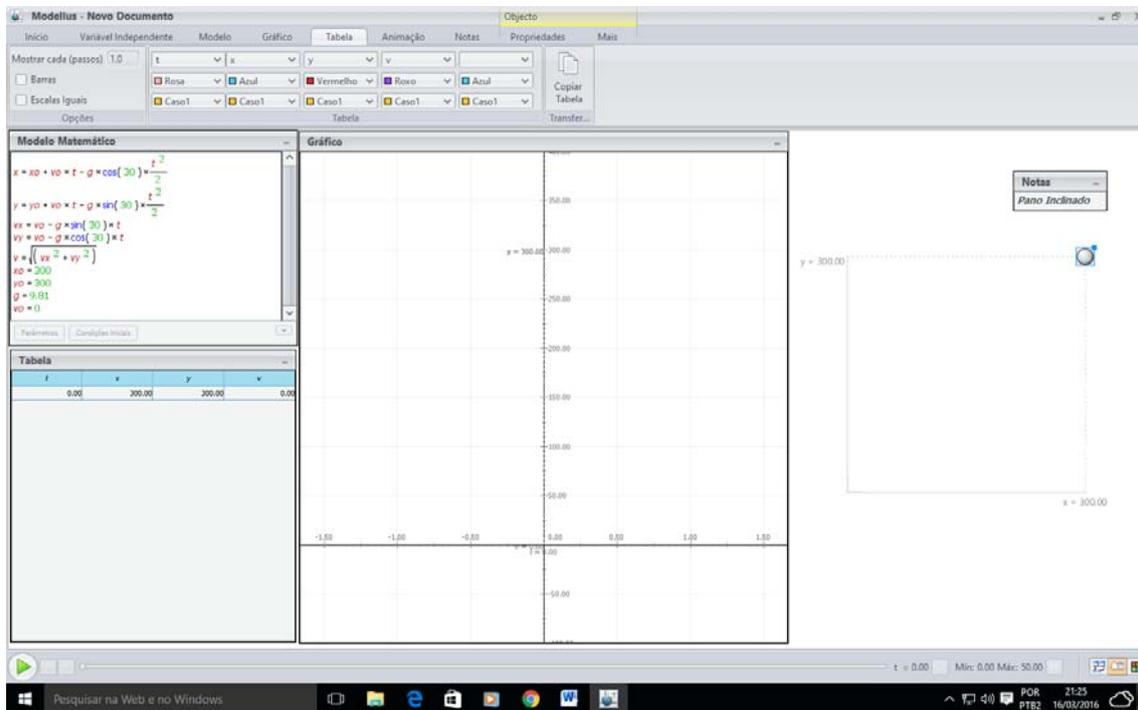
Fonte: *print screen* da aplicação, criada pelo autor, no sistema operacional Windows 7.

2-Mandar interpretar o modelo matemático e corrigi-lo até que o sistema exiba a mensagem de "ok";

3-Ir para a sessão de animação e escolher a partícula que executará o descrito no modelo matemático;

4-Depois a seleção da partícula escolher qual variável estará representada em x e qual estará representada em y, no caso em questão x=x e y=y;

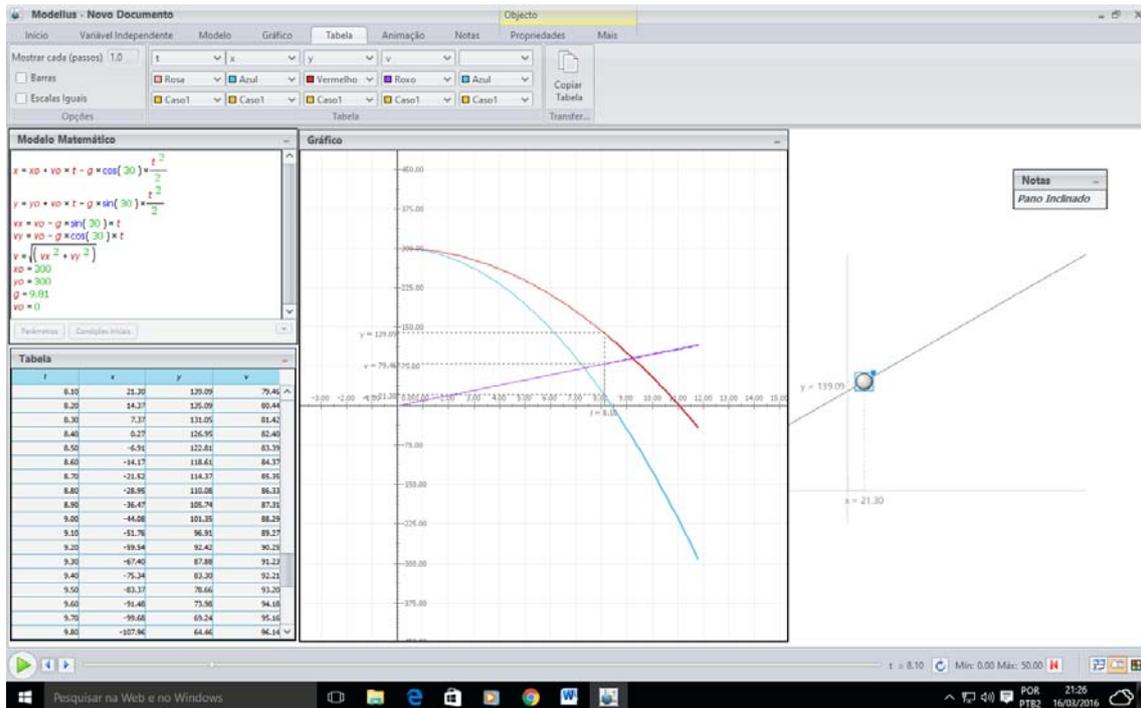
Fonte: *print screen* da aplicação, criada pelo autor, no sistema operacional Windows 7.



Fonte: *print screen* da aplicação, criada pelo autor, no sistema operacional Windows 7.

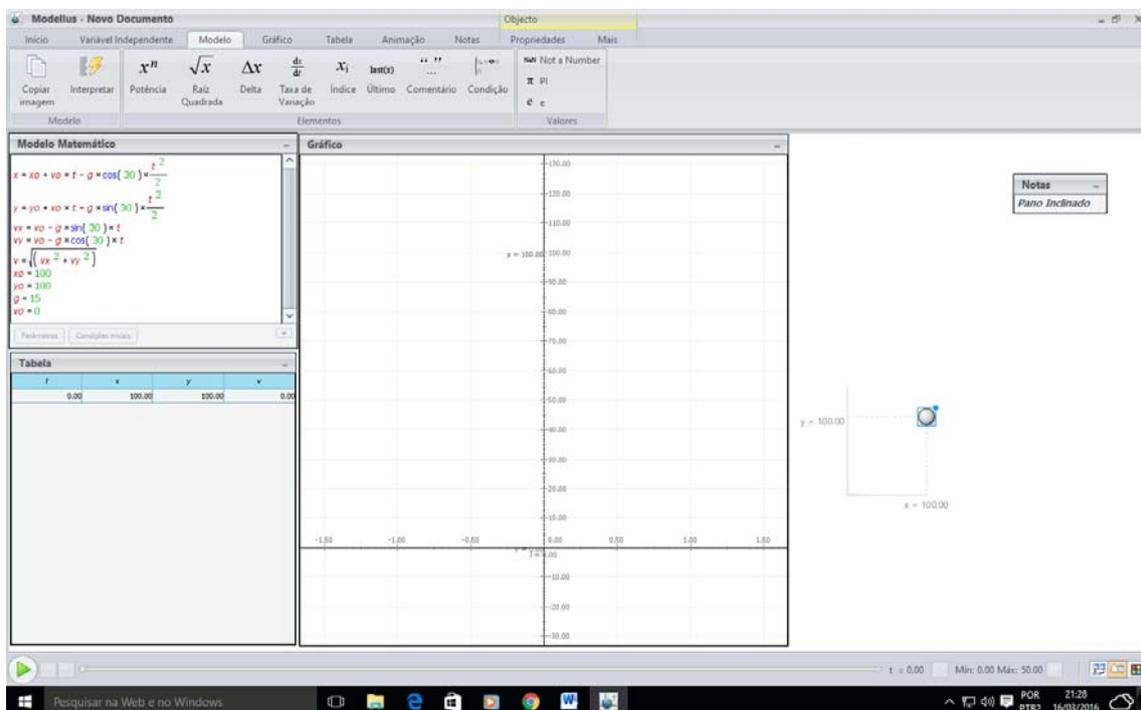
6-Finalmente, nossa modelagem está pronta pra ser rodada.

Ao rodar a modelagem, teremos o movimento simulado pelo objeto escolhido para o mesmo, a tabela será alimentada pelos valores, as curvas gráficas serão construídas e tudo ocorrerá de maneira simultânea.



Fonte: *print screen* da aplicação, criada pelo autor, no sistema operacional Windows 7.

É importante observar que os valores podem ser alterados a qualquer momento e a simulação reiniciada como mostrado abaixo.

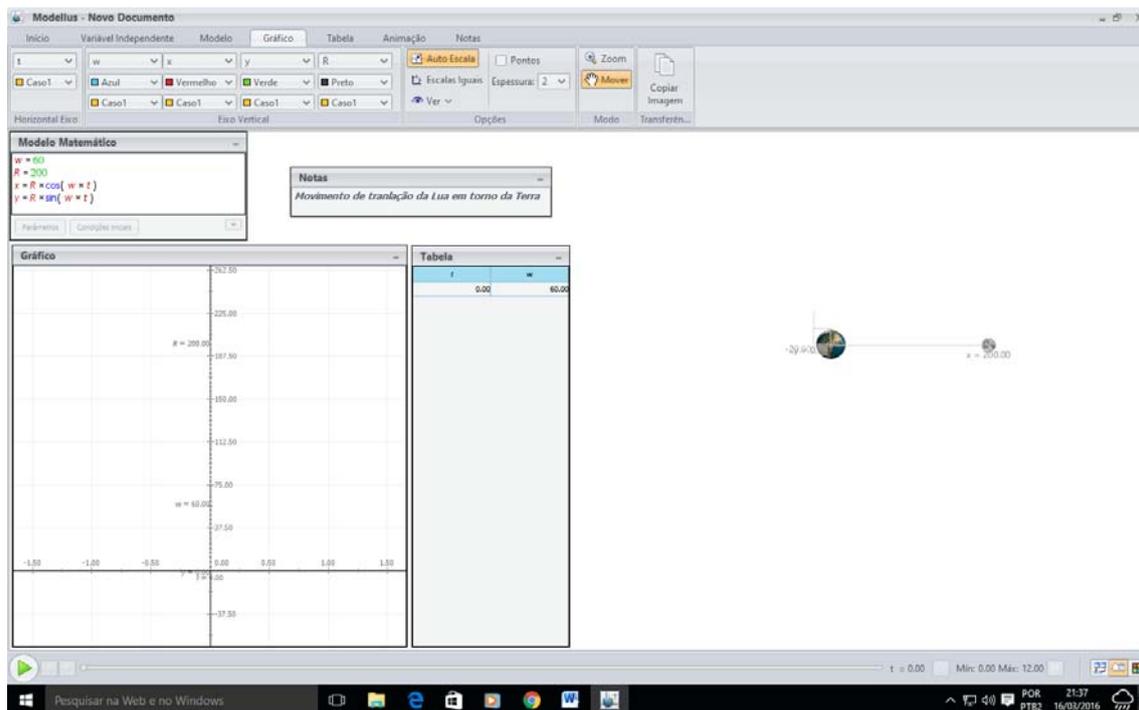


Fonte: *print screen* da aplicação, criada pelo autor, no sistema operacional Windows 7.

7.6 MOVIMENTO DE TRANSLAÇÃO DA LUA

7.6.1 Sequencia para a construção dessa modelagem

1-Digitar as equações cinemáticas, da posição nos eixos x e y, que descrevem o movimento de translação da Lua em torno da Terra, como também os valores da velocidade angular e do raio;

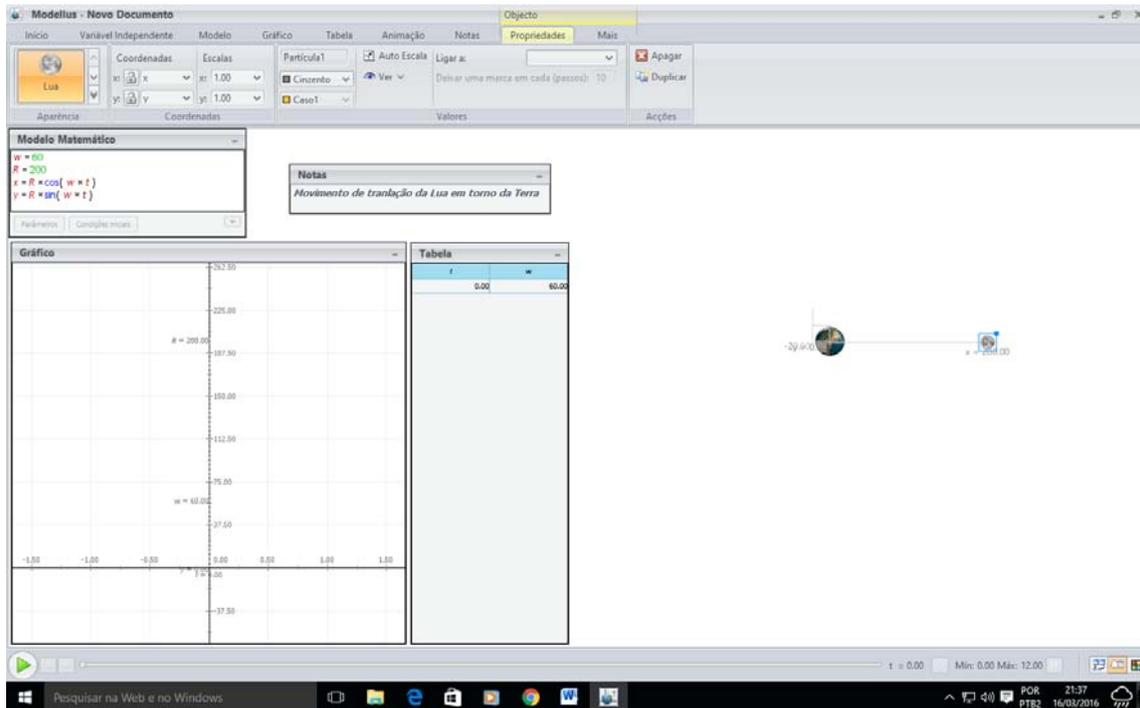


Fonte: *print screen* da aplicação, criada pelo autor, no sistema operacional Windows 7.

2-Mandar interpretar o modelo matemático e corrigi-lo até que o sistema exiba a mensagem de "ok";

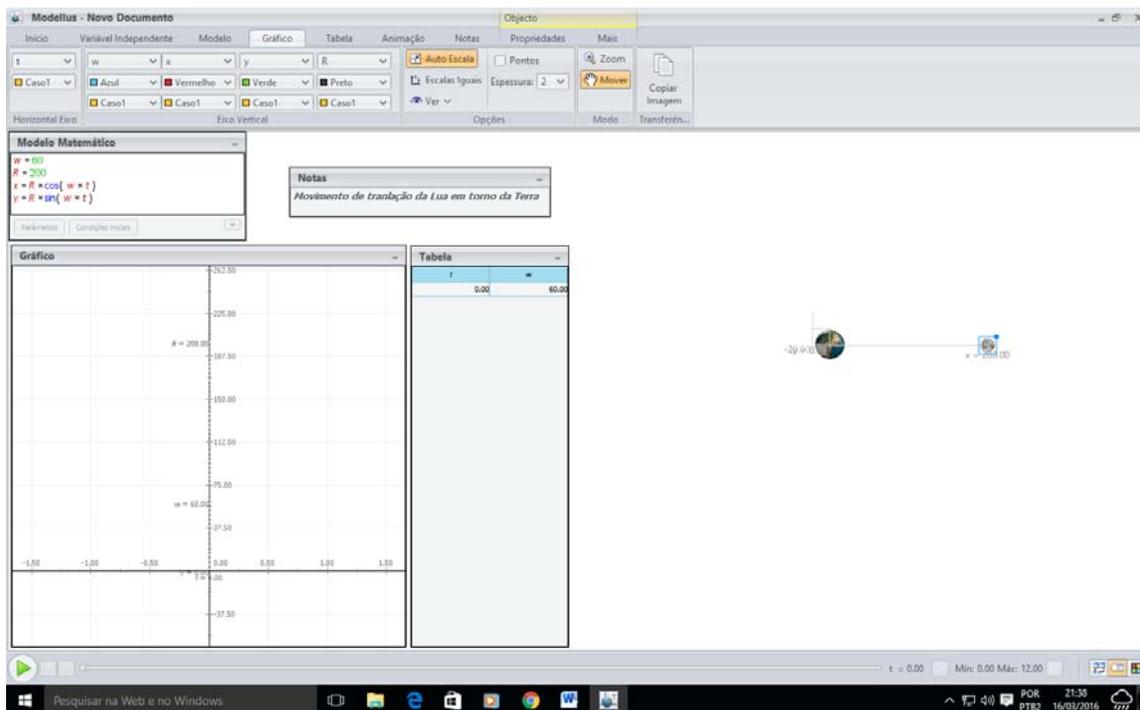
3-Ir para a sessão de animação e escolher a partícula que executará o descrito no modelo matemático;

4- Após a seleção da partícula escolher qual variável estará representada em x e qual estará representada em y, no caso em questão $x=x$ e $y=y$;

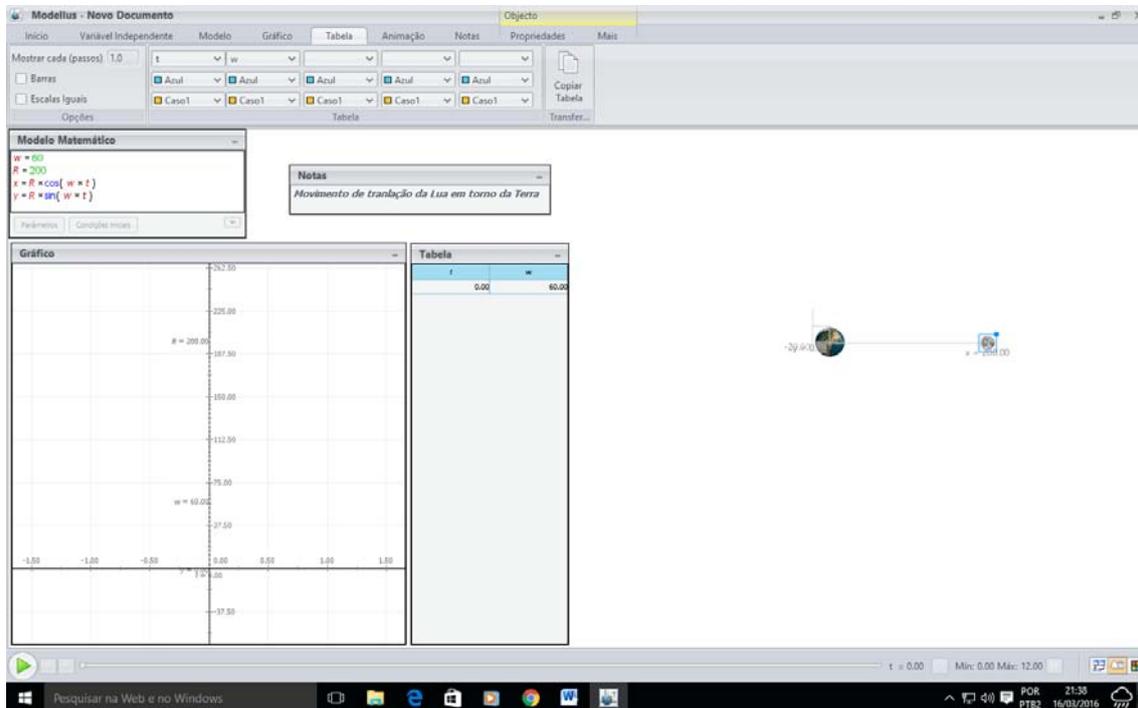


Fonte: *print screen* da aplicação, criada pelo autor, no sistema operacional Windows 7.

5-Escolher as variáveis cujos comportamentos serão descritos no gráfico e na tabela, para tanto se seleciona as sessões gráfico e tabela e efetuam-se as escolhas de variáveis e cores das curvas



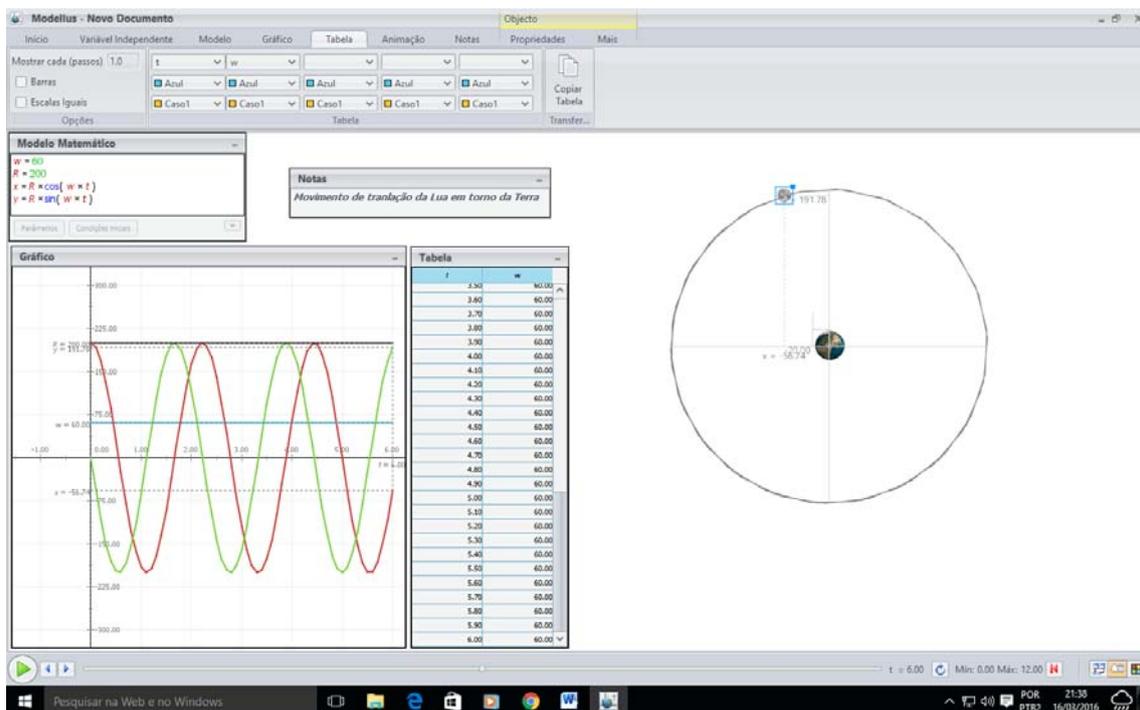
Fonte: *print screen* da aplicação, criada pelo autor, no sistema operacional Windows 7.



Fonte: *print screen* da aplicação, criada pelo autor, no sistema operacional Windows 7.

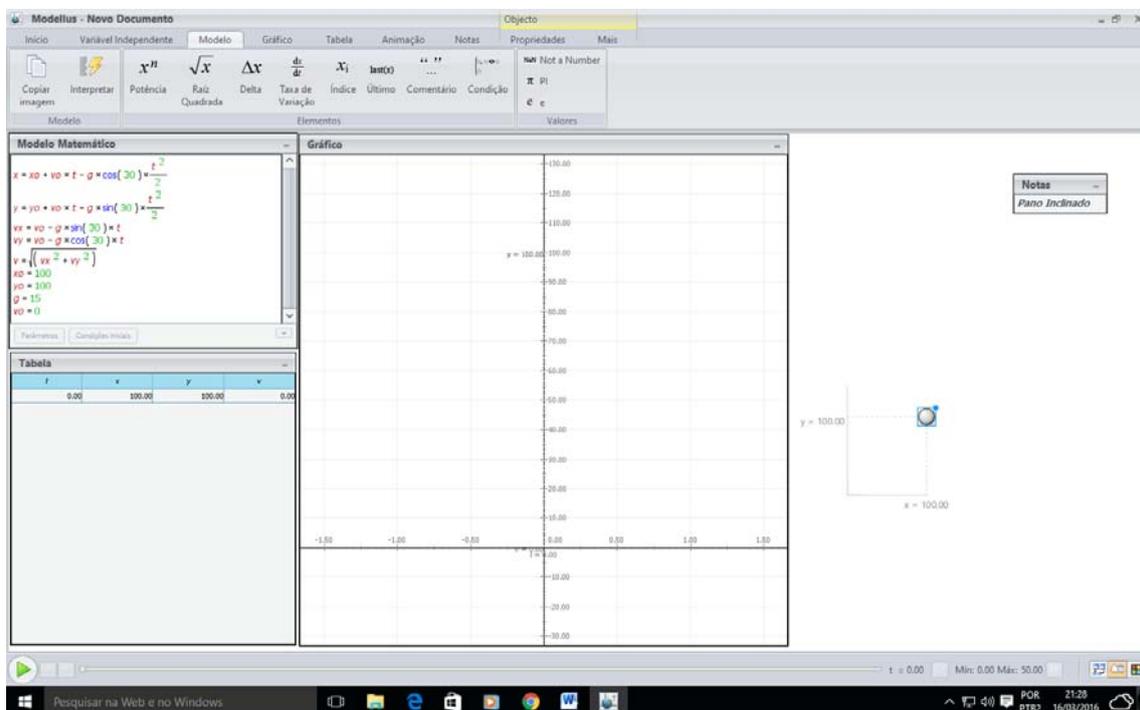
6-Finalmente, nossa modelagem está pronta pra ser rodada.

Ao rodar a modelagem, teremos o movimento simulado pelo objeto escolhido para o mesmo, a tabela será alimentada pelos valores, as curvas gráficas serão construídas e tudo ocorrerá de maneira simultânea.

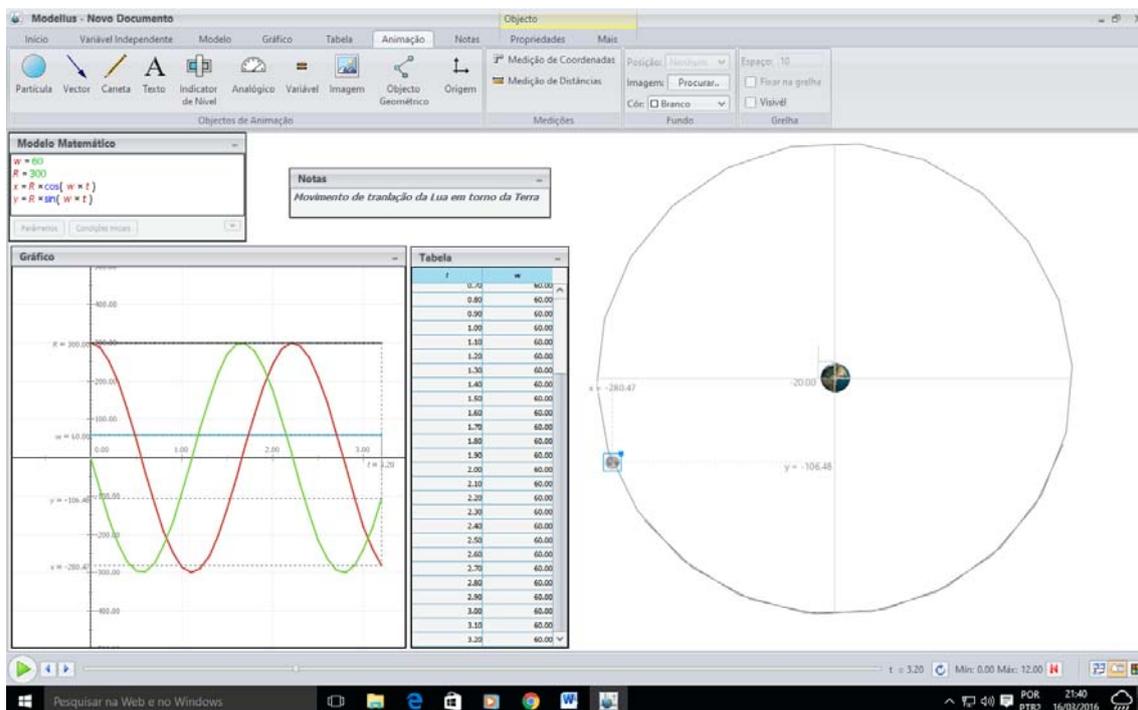


Fonte: *print screen* da aplicação, criada pelo autor, no sistema operacional Windows 7.

É importante observar que os valores podem ser alterados a qualquer momento e a simulação reiniciada como mostrado abaixo.



Fonte: *print screen* da aplicação, criada pelo autor, no sistema operacional Windows 7.



Fonte: *print screen* da aplicação, criada pelo autor, no sistema operacional Windows 7.

REFERÊNCIAS

KOBASHIGAWA, A.H.; ATHAYDE, B.A.C.; MATOS, K.F. de OLIVEIRA; CAMELO, M.H.; FALCONI, S. **Estação ciência: formação de educadores para o ensino de ciências nas séries iniciais do ensino fundamental**. In: IV Seminário Nacional ABC na Educação Científica. São Paulo, 2008. p. 212-217. Disponível em: <http://www.cienciamao.usp.br/dados/smm/_estacaocienciaformacaodeeducadoresparaoensinodocienciasnasseriesiniciaisdoensinofundamental.trabalho.pdf>. Acesso em: 05 de março de 2016.

Ministério da Educação; **Parâmetros Curriculares Nacionais**. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/secad/arquivos/pdf/coea/manualformador.pdf> Acesso em 17 de março de 2002.

ZABALA, A. **A Prática Educativa**: Como educar. Porto Alegre, 1998.

APÊNDICE C

ARTIGO SUBMETIDO

RECONSTRUINDO A GRAVITAÇÃO UNIVERSAL E SEUS FUNDAMENTOS EPISTEMOLÓGICOS

Submissão da conjectura de universalidade aos dados da NASA

REBUILDING THE UNIVERSAL GRAVITATION

Edson Santos Júnior
professorredsonjunior@gmail.com

Jenner Barretto Bastos Filho
jenner@fis.ufal.br

Resumo

Neste artigo, foi elaborada uma construção teórica, enquanto narrativa didático-pedagógica da unificação da Física de Galileu com a Astronomia de Kepler realizada por Isaac Newton na teoria da Gravitação Universal e, para tanto, nos orientamos por Bastos Filho (1995). Essa teoria é de extrema importância para a ciência, uma vez que, possibilitou entender o comportamento dos planetas em suas trajetórias em torno do sol, tornando-se condição *sine qua non* para a exploração espacial. Foram incorporados e conectados na construção teórica, quadros conceituais teóricos que subjazem a esse complexo processo de unificação, bem como os fundamentos epistemológicos nele envolvidos, como aqueles propiciados por Newton (1987), Galileu (1935), Peirce (1975), Kuhn (1990), Popper (1994), Contador (2012), Bryant (1920) entre outros. Foi realizada, ainda, uma verificação das equações obtidas através da análise de uma conjectura de universalidade, com dados encontrados no site da National Aeronautics and Space Administration (NASA).

Palavras chave: Unificação, Newton, Kuhn, Popper, Peirce.

Abstract

In this article, a theoretical construction has been prepared, as didactic and pedagogical narrative of the unification of Galileo's Physics with Kepler's Astronomy and, for both, we were guide by Bastos Filho (1995). This theory is extremely important for Science, once enabled us to understand the behavior of the planets in their paths around the Sun, becoming a condition *sine qua non* for space exploration. Were built and connected to the theoretical construction, theoretical conceptual charts that underlie this intricate process of unification and the epistemological foundations involved in it, as those provided by Newton (1987), Galileo (1935), Peirce (1975), Kuhn (1990), Popper (1994), Contador (2012), Bryant (1920) among others. Was also held a verification of the equations obtained through the analysis of a conjecture of universality with data found on the website of National Aeronautics and Space Administration (NASA).

Key Words: Unification, Newton, Kuhn, Popper, Peirce.

1 INTRODUÇÃO

Haveremos de convir, de antemão, que a história da ciência, tomada em seu sentido lato, embora não se confunda propriamente com a história das revoluções científicas, sem dúvida, a segunda é parte constituinte de grande importância da primeira. Dessa forma, com Copérnico, questionou-se contundentemente o geocentrismo, construíram-se alicerces com a física de Galileu e a astronomia de Kepler e promoveu-se uma grande revolução científica, que culminou no paradigma newtoniano, carregando em seu bojo a Gravitação Universal: uma unificação que requereu a invenção de conceitos novos e revolucionários como os de massa, espaço absoluto, tempo absoluto e força, dando a esses um poder que depois de algum tempo veio a se tornar quase que natural na concepção dos indivíduos que se educaram no contexto desse novo paradigma. Mas não podemos falar sobre tão grande obra do conhecimento, tal como a unificação da física de Galileu com a astronomia de Kepler realizada por Newton, sem falar em sua concepção, sem nos perguntar e lançar conjecturas de como tal grandioso feito foi alcançado, não tanto por razões estritamente psicológicas e sim para procurarmos algumas luzes que nos possam orientar para que venhamos a emitir algum parecer sobre a natureza da ciência que, neste caso específico e à luz da concepção kuhniana acerca das características das revoluções científicas, diz respeito ao período de transição revolucionária e não de ciência normal. Cogitemos acerca da importante questão segundo a qual se este extraordinário episódio da história da ciência pode ou não ser razoavelmente concebido quer seja à luz de inferências indutivas quer seja a partir de inferências dedutivas, ou até mesmo a partir de uma combinação desses dois tipos de inferências.

Vejamos que o próprio Newton (1987, p. 170) escreveu no Escólio Geral dos *Principia* que "Nessa filosofia as proposições particulares são inferidas dos fenômenos, e depois tornadas gerais pela indução"

Pode causar uma certa estranheza aos olhos de intérpretes de finais do século XX e começo do século XXI que tão grandioso episódio que caracteriza a unificação por Newton da física de Galileu dos movimentos locais com a astronomia de Kepler tenha sido atribuído, pelo próprio Newton, como resultante de inferências indutivas. Popper (1982) envidou esforços para mostrar essa impossibilidade contrariando tanto o próprio Newton quanto um grande físico do século XX como

Max Born que em relação ao supracitado episódio também reiterou argumentos em prol das inferências indutivas. Ora, para um episódio tão importante, as inferências tanto dedutivas quanto indutivas, por mais articuladas que sejam, ainda carecem de algo mais sutil e singular. A proposta de Popper inspirada em Peirce é o da inferência abductiva.

Para esse arrebatador episódio tomamos de Peirce o termo *abdução* e, à luz de Peirce e de Popper, tentaremos compreender a teoria da Gravitação Universal. Esta tentativa de compreensão e de resignificação tem também objetivo didático e, ao mesmo tempo, tem o objetivo de ensinar uma discussão sobre a natureza da ciência, tomando este exemplo de um episódio revolucionário e extraordinário como referência.

2 ENTENDIMENTO HUMANO

David Hume, apreciador das ideias de Isaac Newton⁴¹, em sua *Investigação Sobre o Entendimento Humano* (1973), ao se perguntar qual é a natureza de todos os nossos raciocínios sobre questões de fato, baseou sua busca por uma resposta na relação de causa e efeito e concluiu, a respeito dessa relação, que todos os nossos raciocínios e conclusões estão fundamentados na experiência, o que o levou a uma última pergunta: “Qual é o fundamento de todas as conclusões tiradas da experiência?”. Ele a responde dizendo que os fundamentos de nossas conclusões não estão no raciocínio. “Digo, pois, que, mesmo depois de termos experiência das operações de causa e efeito, as conclusões que tiramos dessa experiência não são fundadas no raciocínio ou em qualquer processo do entendimento” (HUME, 1973, p. 141).

Segundo Charles Sanders Peirce (1974), em seus *Escritos Coligidos, Conferências Sobre o Pragmatismo*, o raciocínio humano pode ser classificado em três espécies: indução, dedução e abdução. Para Peirce a indução é um processo de investigação experimental no qual se verifica o grau de concordância da teoria

⁴¹Hume sugere que a “ciência do homem” pode se equiparar a recentes conquistas na filosofia natural (com referências claras ao sucesso da astronomia planetária de Newton). E durante o início da EPM, ele reproduz Newton em sua rejeição de hipóteses. Portanto, não existem dúvidas de que Hume pretendia que seus leitores acreditassem que Newton tinha dado forma a uma nova espécie de modelo. (SCHLIESSER, E., *Hume's Newtonianism and Anti-Newtonianism*, Disponível em: <<http://plato.stanford.edu/entries/hume-newton/#HumEvaNew>>. Acesso em 07 de Julho de 2014, tradução nossa)

com os fenômenos observados e a probabilidade⁴² do mesmo ocorrer no curso da observação seguinte, o que foi predito por Hume, quando este afirma que “De causas que parecem semelhantes, esperamos efeitos semelhantes” (HUME, 1973, p. 142) nos permitindo, assim, generalizar: “A indução é o procedimento que leva do particular ao universal” (ARISTÓTELES *apud* ABBAGNANO, 2007, p. 556).

Outra forma de raciocínio é a dedução/silogismo como a derivação de uma proposição em outra e como um processo diferente da indução em sua estrutura esquemática, pois indução, reduzidamente, é a passagem do particular ao universal e a dedução, a passagem do universal ao particular. Abbagnano, por exemplo, assim expressa o raciocínio silogístico:

O silogismo é um raciocínio em que, postas algumas coisas, seguem-se necessariamente algumas outras, pelo simples fato de aquelas existirem. Quando digo 'pelo simples fato de aquelas existirem', pretendo dizer que delas deriva alguma coisa, e, por outro lado, quando digo 'delas deriva alguma coisa', pretendo dizer que não é preciso acrescentar nada de exterior para que a dedução se siga necessariamente. (Ibid., p. 233).

De acordo com Peirce (1974, p. 47), a dedução é o raciocínio da matemática e “Parte de uma hipótese, cuja verdade ou falsidade nada tem a ver com o raciocínio, e cujas conclusões são igualmente ideais”.

Em linhas breves descrevemos a indução e a dedução e, acerca delas, nos deparamos com a incapacidade das mesmas de engendrar a concepção de ideias novas que é a única forma de avançar que a ciência possui. Peirce (1974, p. 52) argumenta em prol da abdução que “...é o processo para formar hipóteses explicativas. É a única operação lógica a introduzir ideias novas; pois que a indução não faz mais que determinar um valor, e a dedução envolve apenas as consequências necessárias de uma pura hipótese”.

Para Peirce a abdução é um juízo perceptivo, um instinto que nos guia e nos faculta o poder de adivinhar os desígnios da natureza através de *insights* da correta interpretação dos fenômenos da natureza. Ele afirma que:

Se o homem adquiriu a faculdade de adivinhar os desígnios da Natureza, não foi certamente através de uma lógica crítica e autocontrolada. Mesmo agora não é capaz de fornecer uma razão exata para as melhores conjecturas. Parece-me que a afirmação mais clara acerca da situação lógica [do problema] (...) é que o homem possui uma Compreensão (Insight)

⁴² PEIRCE, 1974, p. 52.

da Terceiridade⁴³, dos elementos gerais, da Natureza, cujos acertos, se não ganham *a priori* do erro, também não se podem dizer que sejam esmagados por ele. Chamei-lhe *Insights*, pois pertence à mesma classe de operações na qual estão incluídos os Juízos Perceptivos. Tem a natureza do Instinto, sendo semelhante aos instintos dos animais no ultrapassar o poder da razão e no sentido de guiar-nos como se estivéssemos de posse de fatos inteiramente fora do alcance dos instintos. Assemelha-se ao instinto também pela reduzida tendência ao erro; embora erremos frequentemente, a frequência relativa com que acertamos é a coisa mais maravilhosa de nossa constituição animal. (PEIRCE, 1974, p. 53).

Nos debruçamos em exaustivas análises dos resultados das experiências, deduzimos a partir desses resultados e induzimos novos, de novos experimentos, para que em dado momento a abdução nos abra os olhos ao que então parecerá óbvio mas que estava encoberto sob o véu de nossa, já vencida, ignorância.

3 O LEGISLADOR DOS CÉUS

No ano de 1609 em uma publicação intitulada “Sobre o Movimento de Marte”, o astrônomo alemão Johannes Kepler (1571 - 1630) – herdeiro de uma grande gama de dados obtidos a partir de observações do céu realizadas por seu mestre Tycho Brahe – após exaustivas análises, anunciou que os planetas se movem em órbitas elípticas em torno do Sol e que este ocupa um dos focos da elipse.

A verdade da natureza, que eu desprezara, voltou às escondidas pela porta traseira, disfarçando-se para ser aceita. Desprezei a primeira equação e voltei às elipses acreditando ser essa uma hipótese inteiramente diversa, ao passo que as duas, como provarei no capítulo seguinte, são a mesma... Pensei e calculei até a beira da loucura o motivo que o planeta preferia uma órbita elíptica... Ah que tolo que eu fui... (KEPLER *apud* CONTADOR, 2013, p. 175)

Thomas Kuhn o caracterizou como um neo platônico fiel que norteou seu trabalho na crença de que “leis matemáticas simples são a base de todos os fenômenos naturais e que o Sol é a causa física de todos os movimentos celestes” (KUHN, 1990, p. 246). Kepler buscou, também, outras formas de harmonia no movimento planetário, chegando a sua segunda lei na qual estabeleceu que “a velocidade orbital de cada planeta varia de tal modo que uma linha que una o

⁴³ Peirce defende que o estudo fenomenológico tem como condição para sua realização o exercício de três faculdades que ele classificou como categorias universais e as denominou Presentidade ou Primeiridade, Conflito ou Segundidade e Terceiridade. A Primeiridade é a qualidade de sentimento, a primeira percepção. A Segundidade é o fato, o material. A Terceiridade é a interpretação do fenômeno, a passagem do objeto para signo, a ponte entre a Primeiridade e a Segundidade através da qual interpretamos o mundo.

planeta ao Sol cobre áreas iguais da elipse em intervalos de tempo iguais” (KUHN, 1990, p. 246). Mas sua grande sinfonia teve como ápice um novo tipo de lei astronômica, cujo acorde final é uma lei geral que estabelece a relação entre as velocidades dos planetas em órbitas diferentes. A Terceira Lei, enunciada em 1619, em “As Harmonias do Mundo” diz que “A proporção existente entre intervalos de tempo de quaisquer dois planetas é exatamente a proporção sesquiáltera⁴⁴ da distância média das órbitas” (KEPLER *apud* BRYANT, 1920 p. 50, tradução nossa).

Das palavras de Kepler, podemos inferir que o quociente entre o quadrado do período de revolução em torno do Sol e o cubo de sua distância média ao mesmo Sol é constante, sendo essa constante válida para todos os planetas do sistema solar.

4 DUAS NOVAS CIÊNCIAS

No sexto mês do ano de 1639 de Nosso Senhor, em seu confinamento, praticamente cego, Galileu Galilei segurou em suas mãos um exemplar de sua obra “Discorsi e Dimostrazioni Matematiche intorno a Due Nuove Scienze⁴⁵” na qual tratava do movimento da queda dos corpos, definindo esse movimento como sendo uniformemente acelerado.

Quando, portanto, observo uma pedra que cai de uma certa altura a partir do repouso e que adquire pouco a pouco novos acréscimos de velocidade, por que não posso acreditar que tais acréscimos de velocidade não ocorrem segundo a proporção mais simples e mais óbvia? Se considerarmos atentamente o problema, não encontraremos nenhum acréscimo mais simples que aquele que sempre se repete da mesma maneira. O que entenderemos facilmente, se considerarmos a estrita afinidade existente entre o tempo e o movimento: do mesmo modo, com efeito, que a uniformidade do movimento se define e se concebe com base na igualdade dos tempos e dos espaços (com efeito, chamamos movimento uniforme ao movimento que em tempos iguais percorre espaços iguais), assim também, mediante uma divisão do tempo em partes iguais, podemos perceber que os aumentos de velocidade acontecem com simplicidade; concebemos no espírito que um movimento é uniforme e, do mesmo modo, *continuamente* acelerado, quando, em tempos iguais quaisquer, adquire aumentos iguais de velocidade. (GALILEI, 1985, p. 127, grifo nosso).

Observa-se, nas palavras de Galileu, a necessidade de adoção de uma gravidade constante, sendo então, *conditione sine qua non* para descrever o movimento de queda de uma pedra.

⁴⁴ Com o termo *sesquiáltera* Kepler refere-se a proporção três meios, 3/2.

⁴⁵ Discursos e demonstrações matemáticas relativas às Duas Novas Ciências

5 PRINCÍPIOS MATEMÁTICOS

Em 1687, sob o título de “Princípios Matemáticos da Filosofia Natural”, Sir Isaac Newton publicou descobertas, feitas cerca de vinte anos antes, durante seu refúgio da grande peste que assolou a Grã Bretanha em 1666. Nessa obra, Newton sintetiza a astronomia de Kepler e a física de Galileu, concebendo as três leis fundamentais da mecânica e a Lei da Gravitação Universal.

Até aqui explicamos os fenômenos dos céus e de nosso mar pelo poder da gravidade, mas ainda não designamos a causa desse poder. É certo que ele deve provir de uma causa que penetra nos centros exatos do sol e planetas, sem sofrer a menor diminuição de sua força; que opera não de acordo com a quantidade das superfícies das partículas sobre as quais ela age (como as causas mecânicas costumam fazer), mas de acordo com a quantidade de matéria sólida que elas contêm, e propaga sua virtude em todos os lados a imensas distâncias, decrescendo sempre no inverso do quadrado das distâncias. A gravitação com relação ao sol é composta a partir das gravitações com relação às várias partículas das quais o corpo do sol é composto; e ao afastar-se do sol diminui com exatidão na proporção do quadrado inverso das distâncias até a órbita de Saturno, como evidentemente aparece do repouso do apogeu dos planetas; mas ainda, e mesmo para os mais remotos apogeus dos cometas, se estes apogeus estão também em repouso. (NEWTON, 1987, p. 170).

Das palavras de Newton concluímos que “a matéria atrai a matéria na razão direta das massas e na inversa do quadrado das distâncias” (LACEY, 1983, p. IX)⁴⁶, o que nos leva a uma constante universal e uma aceleração da gravidade variável.

Segundo Thomas S. Kuhn em “A Revolução Copernicana” (1990), em meados do século XVII Descartes, Borelli, Hooke, Huyghens e Newton reconheciam que para um planeta descrever uma órbita fechada em volta do Sol, era *condition sine qua non* o planeta “cair” continuamente para o Sol, convertendo assim, seu movimento inercial linear em curvilíneo. Em 1666, Newton se debruçou sobre o problema da atração gravitacional, chegando à solução matemática do cálculo da velocidade com a qual um planeta deve cair em direção ao Sol de forma a ter estabilidade em sua órbita e, em sua solução, a velocidade de queda depende do raio da órbita circular do planeta. Newton, ao perceber que “se as velocidades dos planetas e os seus raios orbitais estivessem relacionados entre si pela terceira lei de Kepler, então a atração que leva os planetas para o Sol deveria diminuir inversamente ao quadrado da distância que os separa do Sol” (KUHN, 1956, p. 289).

⁴⁶ LACEY, H. M., Newton, Vida e Obra, Coleção Os Pensadores, 1983, p. IX.

Newton percebeu também, que a mesma lei deveria explicar a diferença entre a queda da Lua em relação à Terra e de uma pedra próxima a superfície do planeta.

6 RECONSTRUINDO A GRAVITAÇÃO UNIVERSAL

À luz da crítica ao indutivismo, Karl R. Popper (1980, p. 24), relata: “A teoria de Newton, indubitavelmente deve muito às teorias de Galileu e Kepler; tanto, que o próprio Newton as considerou como sendo premissas indutivas (parciais)”. Nessa obra, Popper discorre muito sucintamente, sobre a inconsistência em se considerar Teoria da Gravitação Universal de Newton como sendo o resultado das inferências indutivas a partir das premissas de ambas, tanto da física de Galileu quanto da astronomia de Kepler.

Façamos então uma reconstrução racional do caso da unificação de Newton da Astronomia de Kepler com a Física de Galileu e que resulta na Gravitação Universal, a fim de entender suas semelhanças, diferenças e uma possível forma de compreensão de seu significado. Em nossa reconstrução racional, tal como argumentou Bastos Filho (1995), admitiremos como método de concepção da teoria da Gravitação Universal, o método das conjecturas – nesse caso, a conjectura de universalidade – para fenômenos disparees como a queda livre de uma maçã, uma pedra que gira presa a um barbante, a Terra orbitando o Sol, as marés, um corpo que desce um plano inclinado sem atrito e o lançamento de projéteis.

Neste exato momento, faz-se necessário enfatizar que a abordagem por nós proposta não é propriamente nem a de história da ciência nem a de pseudo-história e sim a de uma proposta que tem como objetivo precípuo nos engajar em uma narrativa que enseje uma compreensão didática e significativa da unificação newtoniana para estudantes dos tempos hodiernos. É também importante que nos atenhamos ao fato de que aqui estamos nos beneficiando de trabalhos de historiadores da ciência e de epistemólogos resguardando o nosso foco centrado muito mais no ensino de ciências, notadamente aqui, nos ensinamentos, de alguma maneira combinados, da física, da matemática e da astronomia.

6.1 RELACIONANDO G COM K DE KEPLER

Durante o século XVII, segundo Thomas S. Kuhn (1990, p. 285), uma pergunta pairava no ar respirado por alguns dos maiores pensadores da época: “por que razão os corpos pesados caem para a superfície de uma Terra móvel, seja qual for a posição da Terra no espaço?” E como resposta de Descartes tivemos: “Corpos soltos são conduzidos para a Terra pelo impacto dos corpúsculos aéreos no remoinho centrado na Terra” (DESCARTES *apud* KUHN, 1990, p. 285). Para os copernicanos: “os corpos pesados são levados para a Terra por um princípio atrativo intrínseco que atua entre as partes da matéria” (KUHN, 1990, p. 285). Para o próprio Copérnico em “De Revolutionibus”, “Agora parece-me a gravidade [que aqui significa simplesmente peso] não é mais do que uma inclinação natural, conferida às partes dos corpos pelo Criador, para combinar as partes na forma de uma esfera” (COPERNICO *apud* KUHN, 1990, p. 286). E para Kepler, a solução para essa pergunta consistia em “um princípio atrativo atuando entre a Terra e suas partes” (KUHN, 1990, p. 286).

Após meados do século XVII, Descartes, Borelli, Hooke, Huygens e também Newton, admitiram que a órbita elíptica da Terra em torno do Sol, só era concebível, se esta estivesse em contínua queda em direção ao Sol transformando assim um movimento retilíneo inercial em um movimento curvilíneo e, portanto, acelerado, mas esta queda precisava ser entendida, por essa razão, vieram as tentativas de explicação.

Segundo Kuhn (1990, p. 285), para Descartes, os planetas “eram empurrados em direção ao Sol pelo impacto corpuscular”. Para Borelli (KUHN, 1990, p. 286), os planetas “possuíam uma tendência natural para se moverem em direção ao Sol”. Para Hooke, “eram levados para o Sol por uma atração mutua intrínseca” (KUHN, 1990, p. 286). Observemos que todas as explicações elencadas acima, estão em consonância com as ideias de seus respectivos autores sobre a queda dos corpos em direção a Terra.

Ainda segundo o autor de “A Revolução Copernicana”, Robert Hooke e Isaac Newton, possivelmente levados pelas ideias de René Descartes de um mecanismo em comum para a queda da Terra em direção ao Sol e de um corpo sobre a Terra, propuseram que a atração gravitacional entre uma pedra e a Terra, quanto à natureza e concepção, é a mesma atração gravitacional entre a Terra e o Sol.

Newton, por volta de 1666, chegou à determinação matemática da velocidade de um planeta em torno do Sol e a conclusão de que a velocidade de translação de um planeta e o raio de sua órbita estão relacionados pela Terceira Lei de Kepler e, portanto, para Newton, a força de atração sobre o planeta devido a sua interação com o Sol varia com o inverso do quadrado da distância entre seus centros de massa. As conclusões de Newton não pararam por aí, chegando a outra também de grande amplitude, que consistiu em aplicar a primeira conclusão à queda de uma maçã, por exemplo, na superfície da Terra.

O caminho trilhado por Newton, ao construir a Lei da Gravitação Universal, pode parecer ingenuamente natural a um intelecto desavisado, mas não pode ter sido de outra forma, senão, o caminho da adoção da conjectura ousada de um G universal, como disse Bastos Filho (1995).

Lembremo-nos das três Leis de Kepler:

1ª Lei – Lei das Órbitas.

“Todo planeta move-se em órbita elíptica com o Sol ocupando um de seus focos”. (CONTADOR, 2013, p. 170).

2ª Lei – Lei das áreas.

“Um planeta varre áreas iguais, em tempos iguais” (Ibid., p. 180).

3ª Lei – Lei dos períodos.

Os quadrados dos períodos dos planetas (ou seja, os respectivos quadrados dos tempos que os planetas levam para efetuar uma órbita completa em torno do Sol) são respectivamente proporcionais aos respectivos cubos de seus semieixos maiores. (Ibid., p. 191).

De acordo com Huygens, a aceleração que é impressa em uma pedra, através de um barbante preso a ela, enquanto a mesma gira acionada por um garoto, é dada por:

$$a_{cp} = \frac{v^2}{r} \quad (1),$$

onde v é a velocidade linear, para o caso em estudo, de módulo constante e r é o raio da circunferência de comprimento c descrita pela pedra em sua trajetória. Sabemos da geometria plana, que v pode ser escrita como:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{c}{\Delta t_{\text{volta}}},$$

logo,

$$v = \frac{2\pi r}{T} \quad (2),$$

onde T é o período do movimento circular uniforme descrito pela pedra. De (2) em (1), temos:

$$a_{\text{cp}} = \frac{\left(\frac{2\pi r}{T}\right)^2}{r} = \frac{4\pi^2 r^2}{T^2 r} \quad \therefore \quad a_{\text{cp}} = \frac{4\pi^2 r}{T^2} \quad (3).$$

A primeira e a segunda Leis de Kepler tratam de trajetórias elípticas, entretanto, para o caso particular de uma trajetória circular na qual os focos coincidem, elipse de excentricidade 1, temos essas leis satisfeitas pela equação (3) – deduzida a partir do caso supra citado, porém generalizada para os planetas. E, para tanto, basta considerar a simetria de uma trajetória circular, observando, assim, que serão percorridas pelo raio vetor, áreas iguais em tempos iguais. Evidentemente, para o caso geral de uma trajetória elíptica, temos que a velocidade de um planeta ao longo de sua trajetória, será maior no periélio e menor no afélio, levando o raio vetor a varrer áreas iguais em tempos iguais.

A terceira Lei de Kepler nos diz que:

$$T^2 = k \cdot r^3,$$

na qual, T é o período de revolução do planeta em torno do Sol, r é a distância média do centro de massa do planeta ao centro de massa do Sol e k é a constante de proporcionalidade que caracteriza essa lei, logo:

$$k = \frac{T^2}{r^3} \quad (4).$$

Inserindo a terceira lei na equação (3), temos:

$$a_{cp} = \frac{4\pi^2 r}{kr^3} \quad \therefore \quad a_{cp} = \frac{4\pi^2}{kr^2} \quad (5).$$

Em “Philosophiae Naturalis Principia Mathematica⁴⁷”, Newton enunciou os três axiomas que ficariam conhecidos como as Três Leis de Newton:

LEI I – Todo corpo permanece em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em linha reta, a menos que seja obrigado a mudar seu estado por forças impressas nele.

LEI II – A mudança do movimento é proporcional à força motriz impressa, e se faz segundo a linha reta pela qual se imprime essa força.

LEI III – A uma ação sempre se opõe uma reação igual, ou seja, as ações de dois corpos um sobre o outro sempre são iguais e se dirigem a partes contrárias. (NEWTON, 1983, p. 14).

Da segunda lei, também conhecida como Princípio Fundamental da Dinâmica (PFD), temos que para o nosso caso aqui de uma massa m constante:

$$\vec{f} = \frac{d\vec{p}}{dt} \quad \text{sendo} \quad \vec{p} = m\vec{v} \quad \text{temos:}$$

$$\vec{f} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} = m \frac{d\vec{v}}{dt}.$$

Como a derivada da velocidade em relação ao tempo é a aceleração, temos então que:

$$\vec{f} = m\vec{a}.$$

E podemos então aplicar essa relação para a equação 5, encontrando a força centrípeta que age sobre um planeta em sua trajetória em torno do Sol.

⁴⁷ Princípios Matemáticos da Filosofia Natural

$$\vec{f}_{cp} = m\vec{a}_{cp}, \text{ em módulo:}$$

$$f_{cp} = m \frac{4\pi^2}{kr^2} \quad (6).$$

A equação (6) é um resultado válido para os planetas orbitando em torno do Sol.

Em “Duas Novas Ciências”, Galileu anunciou, em sua terceira jornada, como proposição II do teorema II que “se um móvel, partindo do repouso, cai com movimento uniformemente acelerado, os espaços por ele percorridos em qualquer tempo estarão entre si na razão dupla dos tempos, a saber, como os quadrados desses mesmos tempos” (GALILEO, 1985, p. 136).

A proposição acima resultou na mais famosa lei de Galileu, a lei da queda livre, onde⁴⁸:

$$h = \frac{1}{2}gt^2 \quad (7),$$

na qual h é altura percorrida por um corpo em queda livre, t o tempo associado e g a aceleração de queda.

Derivando a equação (7) em relação ao tempo, obtemos:

$$v = \frac{dh}{dt} = gt \quad (8).$$

Derivando mais uma vez, obtemos a aceleração desse corpo durante a queda, a aceleração da gravidade.

$$a = \frac{dv}{dt} = g \quad (9).$$

⁴⁸ De um ponto de vista histórico, a expressão (7) está imbuída da geometria analítica que foi um desenvolvimento de Descartes, um contemporâneo de Galileu. Galileu usou a geometria dos gregos, tal como no enunciado exibido no texto e não a geometria analítica que no fundo é uma confluência entre a geometria e a álgebra, ou seja, a algebrização da geometria. Para detalhes de uma discussão contextualizada, ver(Bastos Filho, 2012, p.65-83).

Aplicando o PFD ao resultado acima, encontramos a força que age sobre o corpo durante sua queda livre.

$$f = mg \quad (10),$$

onde m é a massa do corpo e f pode ser representado por P , uma vez que, a força em questão é a denominada força peso.

Nosso objetivo é entender a unificação de Newton da astronomia de Kepler com a Física de Galileu; isso é possível através da adoção de “um princípio explicativo universal que numa dada teoria universal é caracterizado por um parâmetro universal G e que a partir de G podemos concluir a respeito da relação de G com k , de G com g , e naturalmente de k com g através de G ” (BASTOS FILHO, 1995, p. 234).

Em nossa busca tomemos como conjectura de universalidade o produto da unificação de Newton traduzida na seguinte relação:

$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \quad (11),$$

onde m_1 e m_2 são duas massas quaisquer e r é a distância entre os seus respectivos centros de massa.

Igualemos a equação (11) a (6) que é um resultado válido para os planetas orbitando em torno do Sol e conseqüente das três leis de Kepler.

$$F = f_{cp}$$

$$G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} = \frac{m 4\pi^2}{k r^2}$$

Admitindo que m_1 é a massa do Sol, representada agora por m_{Sol} e $m=m_2$ é a massa do planeta em órbita, temos:

$$G = \frac{1}{k} \frac{4\pi^2}{m_{Sol}} \quad (12).$$

Quando igualamos m , que é a massa do planeta comparado em seu movimento a uma pedra que gira presa a um barbante, com m_1 , que é a massa do mesmo planeta sofrendo atração gravitacional por parte do Sol, estamos demonstrando grande ousadia que no anacronismo de nossa reconstrução racional nos mostra que Newton, presumivelmente, admitiu a equivalência entre massa inercial⁴⁹ e massa gravitacional⁵⁰.

Sabemos que a equação (12), relação entre o parâmetro G pertencente à Gravitação Universal e o parâmetro K pertencente à Astronomia de Kepler, demonstra que a condição de universalidade de G depende da universalidade de:

$$k \cdot m_{\text{Sol}} \quad (13),$$

e dessa forma podemos generalizar para:

$$k_{\text{Terra}} \cdot m_{\text{Sol}} = k_{\text{Lua}} \cdot m_{\text{Terra}} \quad (14).$$

Fazendo a inserção da Terceira Lei de Kepler 4 em 14, encontramos:

$$m_{\text{Terra}} = \left(\frac{T_{\text{Terra}}}{T_{\text{Lua}}} \right)^2 \times \left(\frac{r_{\text{Lua}}}{r_{\text{Terra}}} \right)^3 \cdot m_{\text{sol}} \quad (15)$$

A equação acima nos permite encontrar a massa de um planeta a partir do seu período de translação, do período de translação de um satélite natural seu e dos raios das órbitas, sua e de seu satélite, e ainda em função da massa do Sol.

Façamos um teste de validade utilizando os dados elencados abaixo e divulgados pela National Aeronautics and Space Administration (NASA).

⁴⁹ Tendência que um corpo possui de conservar o seu movimento retilíneo uniforme.

⁵⁰ Reação do corpo ao campo gravitacional.

$$T_{\text{Terra}} = 365 \text{ dias};$$

$$T_{\text{Lua}} = 27 \text{ dias};$$

$$R_{\text{Órbita}_{\text{Terra}}} = 149.598.262 \text{ km};$$

$$R_{\text{Órbita}_{\text{Lua}}} = 384.400 \text{ km};$$

$$m_{\text{Sol}} = 1.989.100 \cdot 10^{24} \text{ kg}.$$

$$m_{\text{Terra}} = \left(\frac{365 \text{ dias}}{27 \text{ dias}} \right)^2 \times \left(\frac{384.400 \text{ km}}{149.598.262 \text{ km}} \right)^3 \cdot 1.989.100 \cdot 10^{24} \text{ kg}$$

$$m_{\text{Terra}} = 6.168.731 \cdot 10^{18} \text{ kg}$$

Encontramos assim a massa da Terra que difere do valor fornecido pela NASA, de $5.972.190 \cdot 10^{18} \text{ kg}$, em apenas 3,3% sendo, portanto, uma conjectura válida.

6.2 Relacionando G com g

A equação (11) aplicada a um corpo que se encontra a uma altura h , em relação à superfície da Terra, levará à equação:

$$F = G \frac{m_{\text{Terra}} \cdot m_{\text{corpo}}}{(r+h)^2} \quad (16).$$

Como $r_{\text{Terra}} \gg h$ podemos desprezar h , admitindo assim F constante, de tal modo a poder igualar (16) a (10),

$$F = f$$

$$G \frac{m_{\text{Terra}} \cdot m_{\text{corpo}}}{r_{\text{Terra}}^2} = m_{\text{corpo}} \cdot g$$

$$g = G \frac{m_{\text{Terra}}}{r_{\text{Terra}}^2} \quad (17)$$

A equação (16) estabelece a relação existente entre o parâmetro universal G e o parâmetro característico da Física de Galileu g , mas, para tanto, precisamos admitir um F constante através da exclusão de h , admitido aqui de valor desprezível em relação à r_{Terra} , observando que, em (17), r_{Terra} representa o raio da Terra e não

de sua órbita como nas equações anteriores. Mais uma vez demos um ousado salto conjectural em prol da unificação realizada por Newton.

Isolando o parâmetro universal G , obtemos:

$$G = g \frac{r_{\text{Terra}}^2}{m_{\text{Terra}}} \quad (18)$$

Equação análoga, em sua função, a equação (12),

$$G = \frac{1}{k} \frac{4\pi^2}{m_{\text{Sol}}} \quad (12)$$

Sendo a primeira uma relação entre o parâmetro universal G e o parâmetro característico da Física de Galileu g e, a segunda uma relação com o parâmetro universal G e o parâmetro característico da Astronomia de Kepler k .

6.3 Relacionando g com k : Teste Final

Façamos agora, e por fim, o teste conjectural da universalidade de g em relação à k através de G , para tal feito igualemos (12) a (18) e façamos a inserção de (4) em (15).

$$\begin{aligned} g \frac{r_{\text{Terra}}^2}{m_{\text{Terra}}} &= \frac{1}{k} \cdot \frac{4\pi^2}{m_{\text{Sol}}} \\ g &= \frac{4\pi^2 \cdot m_{\text{Terra}}}{r_{\text{Terra}}^2 \cdot m_{\text{Sol}}} \cdot \frac{1}{k} \\ g &= \frac{4\pi^2}{r_{\text{Terra}}^2 \cdot m_{\text{Sol}}} \cdot \left(\frac{T_{\text{Terra}}}{T_{\text{Lua}}} \right)^2 \cdot \left(\frac{r_{\text{órbita Lua}}}{r_{\text{órbita Terra}}} \right)^3 \cdot m_{\text{Sol}} \cdot \frac{R_{\text{órbita Terra}}^2}{T_{\text{Terra}}^2} \cdot \frac{r_{\text{Terra}}}{r_{\text{Terra}}} \\ g &= \frac{4\pi^2 \cdot r_{\text{órbita Lua}}^2}{r_{\text{Terra}}^3 \cdot T_{\text{Lua}}^2} \cdot r_{\text{Terra}} \\ g &= \frac{4\pi^2}{T_{\text{Lua}}^2} \cdot \left(\frac{r_{\text{órbita Lua}}}{r_{\text{Terra}}} \right)^3 \cdot r_{\text{Terra}} \end{aligned}$$

Aplicando os valores já citados com o raio da Terra, também obtido no site da NASA, como sendo 6.371,00 km, temos:

$$g = \frac{4 \cdot 3,14^2}{(27 \cdot 24 \cdot 3600s)^2} \cdot \left(\frac{384.400km}{6.371km} \right)^3 \cdot 6.371.000m$$

$$g = 10,14 \text{ m/s}^2$$

O valor encontrado como resultado do teste da conjectura de universalidade do G de Newton com o g generalizado de Galileu e o k generalizado de Kepler revela grande concordância, uma vez que difere do valor real de 9,81 m/s² em apenas 3,4%.

7 ABDUÇÃO

Muitos acreditam que Isaac Newton, ao realizar essa unificação, utilizou o método da indução ou dedução, como, em algumas etapas, assim o fizemos. Entretanto, segundo Popper em “Conjecturas e Refutações”, isso jamais poderia ter ocorrido, pois, para Popper (1972, p. 24) a indução é “uma argumentação tal que, dadas algumas premissas empíricas (singulares ou particulares), leva a uma conclusão universal, a uma teoria universal, seja com uma certeza lógica, seja ‘probabilisticamente’ (no sentido em que este termo é utilizado no cálculo de probabilidades)”.

Popper defende a inconsistência em se atribuir à Gravitação Universal de Newton um resultado alcançável indutivamente tomando como premissas os resultados de ambas, tanto da Astronomia de Kepler, quanto da Física de Galileu. Essa inconsistência foi evidenciada em diversos momentos de nossa reconstrução racional, a saber, nas palavras de Popper:

A teoria de Galileu sobre a queda dos corpos continha uma constante, g, a constante da aceleração. Segundo a teoria de Newton, g não é uma constante, mas uma variável que depende (a) da massa do corpo atraente (no caso de Galileu, a Terra), e (b) da distância do centro de massa. Para qualquer sistema de dois corpos dos quais um é muito pesado, e o outro de peso desprezível, podemos derivar as três leis de Kepler da teoria de Newton e conseqüentemente explicá-las. Mas, desde que Kepler formulou suas leis para um sistema de muitos corpos consistindo do somatório de vários planetas, elas são, do ponto de vista da teoria de Newton, inválidas. Assim, essas leis não poderiam constituir um sistema seja parcial, seja total de premissas (indutivas ou dedutivas) da teoria de Newton. (POPPER, 1972, p. 24).

Popper refere-se à possibilidade de derivar as três leis de Kepler da Teoria da Gravitação Universal, e isso pode ser feito a partir do caso particular de um satélite, descrevendo uma trajetória circular em torno de um planeta, obviamente sem perda de generalidade.

A única força que atuaria sobre o satélite seria a força de atração gravitacional que sabemos valer:

$$F = G \frac{m_{\text{planeta}} \cdot m_{\text{satelite}}}{r_{\text{órbita}}^2} \quad (13).$$

Lembre-mos da Segunda lei de Newton que o satélite é acelerado em direção ao Sol,

$$f = m_{\text{satelite}} \cdot a_c \quad (14).$$

Como o movimento descrito pelo satélite seria um movimento circular uniforme, uma vez que no caso da trajetória circular os focos da elipse coincidem, temos para aceleração centrípeta,

$$a_c = \omega^2 r_{\text{órbita}} \quad (15),$$

onde ω é a velocidade angular dada por:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (16).$$

A equação acima indica que um ângulo 2π foi percorrido em uma volta completa em um tempo igual ao período de revolução T . Inserindo (16) e (15) em (14) temos,

$$f = \frac{4\pi^2 \cdot m_{\text{satelite}} \cdot r_{\text{órbita}}}{T^2} \quad (17).$$

Por fim, igualando (13) a (17), obtemos uma equação que representa a terceira lei de Kepler, sendo válida também, para as duas primeiras:

$$F = f$$

$$G \frac{m_{\text{planeta}} \cdot m_{\text{satelite}}}{r_{\text{órbita}}^2} = \frac{4\pi^2 \cdot m_{\text{satelite}} \cdot r_{\text{órbita}}}{T^2}$$

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{G \cdot m_{\text{planeta}}} \cdot r_{\text{órbita}}^3$$

Podemos também citar, contra a possibilidade de indução – e ainda que desprezando a contradição epistemológica entre a Gravitação Universal, enquanto conclusão, e a Astronomia de Kepler mais a Física de Galileu, enquanto premissas – o problema da validade do procedimento indutivo que trata do tempo e da certeza de imutabilidade da natureza.

Todas as inferências extraídas da experiência supõem, como fundamento, que o futuro se assemelhará ao passado e que poderes semelhantes estarão unidos a qualidades sensíveis semelhantes. Se houvesse alguma suspeita de que o passado não servisse de regra para o futuro, toda a experiência se tornaria inútil e não poderia dar origem a nenhuma inferência ou conclusão. É possível, portanto, que argumentos extraídos da experiência possam provar a semelhança entre o passado e o futuro, visto que todos os argumentos desse tipo fundam-se na suposição dessa semelhança. Mesmo se admitindo que o curso das coisas sempre regular foi, sem nenhum argumento ou inferência nova, não prova que no futuro continuará assim.

(HUME *apud* ABBAGNANO, 2007, p. 558).

Mas se Newton não realizou sua unificação através do método da indução ou dedução, então, como pode tê-la feito?

Peirce identificou a abdução como método de concepção das leis de Kepler elegendo tal caso como o maior dos exemplos desse método.

A cada estágio de sua longa investigação, Kepler apresenta uma teoria aproximadamente verdadeira, uma vez que satisfaz de maneira aproximada as observações, e ele apenas modifica a teoria depois de uma reflexão cuidadosa e minuciosa, de modo a torná-la mais racional ou próxima do fato observado. Assim, nunca modificando sua teoria caprichosamente, mas sempre através de motivos racionais, quando ele finalmente chega a uma mudança – de grande simplicidade e racionalidade – que satisfaz plenamente a observação, ela destaca um fundamento lógico totalmente diferente do que seria se tivesse surgido ao acaso. Kepler mostra seu aguçado senso de lógica nos detalhes de todo o processo pelo qual ele

finalmente chegou à verdadeira órbita. E essa é a obra prima do raciocínio retrodutivo⁵¹. (SILVA, 2007, p. 134).

Em resposta a essa pergunta, tal como para Kepler na determinação das trajetórias dos planetas, temos Peirce (1974, p. 53) ao afirmar que “Tem que se estar completamente louco para negar que a ciência fez muitas descobertas verdadeiras. Mas todos os elementos de teoria científica que foram estabelecidos até hoje foram-no através da Abdução”. A abdução posiciona-se aqui como único método capaz de unir céus e terra dando a uma maçã o poder de se comportar segundo as leis de um planeta e, portanto, como única possibilidade de concepção da adoção de Newton da conjectura de universalidade.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, nos propusemos a reconstruir o episódio da unificação - realizada por Isaac Newton na teoria da Gravitação Universal, da Física de Galileu com a Astronomia de Kepler - e a discutir, sem o anseio de esgotar o tema, os fundamentos epistemológicos dessa unificação. Ao reconstruí-la obtivemos um texto de apoio para o professor que desejar discuti-la em sala de aula como ferramenta para o desenvolvimento do senso crítico, quanto a produção do conhecimento científico e quanto a pano de fundo para o ensino dos conceitos de física aqui abordados.

Importante ressaltar sobre a análise feita que, considerando o valor encontrado com a equação (15) da sessão 6.1 e o valor encontrado com a associação das equações (4),(12),(15) e (18) na sessão 6.3, concluímos que Newton assumiu uma conjectura de universalidade capaz de unir céus e terra, mas demonstramos, à luz dos argumentos de Popper, não ser possível realizar tal feito por inferências dedutivas ou indutivas e sim por um processo abduativo.

Para Newton ter assumido tal conjectura de universalidade através do método indutivo, as premissas empíricas assumidas sendo elas a Física de Galileu, que trata de um g constante, e a Astronomia de Kepler, que trata de problemas de muitos corpos, levariam a uma conclusão universal, a uma teoria universal que jamais

⁵¹ Peirce introduziu o termo *abduction* (ou *retroductión*) para indicar o primeiro momento do processo indutivo, o da escolha de uma hipótese que possa servir para explicar determinados fatos empíricos (Coll. Pap., apud Abbagnano,2007, p.13).

poderia contrariar as premissas e sabemos que a teoria da Gravitação Universal foi elaborada para dois corpos além de assumir um g variável, logo, contraria fortemente as premissas tornando assim inviável a admissão do processo como sendo o indutivo.

Em Peirce, que identificou a abdução como método de concepção das leis de Kepler elegendo tal caso como o maior dos exemplos, que encontramos a resposta para o método utilizado por Newton e assim, a certeza de que o mesmo cometeu um engano ao afirmar que realizou sua unificação por indução.

9 REFERÊNCIAS

ABBAGNANO, N.; **Dicionário de Filosofia**. Tradução de Alfredo Bosi. São Paulo: Ed. Martins Fontes, 2007.

BASTOS FILHO, J. B. A unificação de Newton da física de Galileu com a astronomia de Kepler à luz da crítica Popperiana à indução. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. vol. 17, n. 3, p.233-242, 1995. Disponível em <<http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/vol17a28.pdf>> Acesso em 06 abr. 2014.

BERTRAND, J. **Os Fundadores da Astronomia Moderna**: Copérnico, Tycho Brahe, Kepler, Galileu, Newton. [S.L.]: Ed. Contraponto, 1865.

BRYANT, W. W. **Kepler**: Pioneers of progress. New York: The Macmillan Company, 1920.

CASTELLANI, O. C. Discussão dos Conceitos de Massa Inercial e Massa Gravitacional. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 23, n. 3, p. 356-359, 2000.

CONTADOR, P. R. M. **Kepler**: O legislador dos céus. São Paulo: Livraria Da Física, 2012.

DAMASIO, F. O início da revolução científica: questões acerca de Copérnico e os epiciclos, Kepler e as órbitas elípticas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 33, n. 3, 2011.

DIAS, P. M. C; SANTOS, W. M. S.; SOUZA, M. T. M. A Gravitação Universal: Um texto para o Ensino Médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 26, n. 3, p. 257-271, 2004.

FEYRABEND, P. K. **Adeus à Razão**. Brasil: Ed. Edições 70, 1991.

GAROZZO, F. **Johannes Kepler**: Os homens que mudaram a humanidade. São Paulo: Editora Três, 1975.

GALILEU, G. **Duas Novas Ciências**. Incluindo: Da Força de Percussão. Tradução e notas de Letizio Mariconda e Pablo R. Mariconda. São Paulo: Ed. Nova Stella, 1935.

GALILEU, G. **Coleção Os Pensadores**, São Paulo, ed. Nova Cultural, 1973.

KUHN, T. S. **A Revolução Copernicana**. Rio de Janeiro: Edições 70, 1990.

NEWTON, I. **Coleção Os Pensadores**. São Paulo: Ed. Nova Cultural, 1973.

NEWTON, I. Princípios Matemáticos da Filosofia Natural (Escólio Geral). In: **Coleção Os Pensadores** - Vol. Galileu & Newton. Tradução de Carlos Lopes de Matos e Pablo Rubén Mariconda. São Paulo: Nova Cultural, 1987.

PEIRCE, C. S. Estudos Coligados: Conferências sobre o Pragmatismo. In: CIVITA, V. (ed.). **Coleção Os Pensadores**: Skinner/Piaget. 1. ed. São Paulo: Ed. Abril Cultural, 1975.

POPPER, K. R. **Conjecturas e Refutações**. 4. ed. Brasília: Ed. Universidade de Brasília, 1972.

POPPER, K. R. **Coleção Os Pensadores**, São Paulo, ed. Nova Cultural, 1973.

POPPER, K. R. **Conocimiento objetivo**. Madrid: Ed. Editorial Tecnos, 1974.

POPPER, K. R. **Conjecturas e Refutações**. Brasília: Ed. Universidade de Brasília, 1994.

SANTOS JÚNIOR, E.; BASTOS FILHO, J. B. **Leis de Newton**: um laboratório virtual. Artigo apresentado no III Encontro Alagoano de Ensino de Ciências e Matemática. Mestrado em Ensino de Física. Programa de Pós Graduação em Ensino de Ciências e Matemática da Universidade Federal de Alagoas. 2º semestre de 2014. Disponível em <
<https://drive.google.com/file/d/0B1r7lhyJF1WPT1gzblhXS0NRTEk/view?pli=>> Acesso em 6 jan. 2016.

SILVA, Ana Paula R. C. Figueiredo. **Metamorfoses do conceito de abdução em Peirce**: o exemplo de Kepler. 2007. Dissertação. Faculdade de Ciências, Secção de história e filosofia das Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2007.

TEIXEIRA, E. S. Os caminhos de Newton para a gravitação universal: uma revisão do debate historiográfico entre Cohen e Westfall. **Caderno Brasileiro de Ensino da Física**. v. 27, n. 2, p. 215-254, 2010.