



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO, FILOSOFIA E**  
**HISTÓRIA DAS CIÊNCIAS.**

**EDVALDO SILVA DOS SANTOS**

**APROPRIAÇÃO DO PRINCÍPIO DA INCERTEZA POR**  
**ESTUDANTES DE QUÍMICA NO CONTEXTO DO ENSINO**  
**DO MODELO ATÔMICO QUÂNTICO**

Salvador

2018

**EDVALDO SILVA DOS SANTOS**

**APROPRIAÇÃO DO PRINCÍPIO DA INCERTEZA POR  
ESTUDANTES DE QUÍMICA NO CONTEXTO DO ENSINO  
DO MODELO ATÔMICO QUÂNTICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ensino, Filosofia e História das Ciências, Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ensino de Ciências.

Orientador: Prof. José Luis de Paula Barros Silva

SALVADOR

2018

**EDVALDO SILVA DOS SANTOS**

**APROPRIAÇÃO DO PRINCÍPIO DA INCERTEZA POR  
ESTUDANTES DE QUÍMICA NO CONTEXTO DO ENSINO DO  
MODELO ATÔMICO QUÂNTICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ensino, Filosofia e História da Ciências, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ensino de Ciências Universidade Federal da Bahia.

Aprovada em 22 de Outubro de 2018

**Banca Examinadora**

José Luiz de Paula Barros Silva\_\_\_\_\_

Doutor em Química, pela Universidade Federal da Bahia, Brasil

Universidade Federal da Bahia.

Bárbara Cristina Tavares Moreira\_\_\_\_\_

Doutora em Química pela Universidade Federal da Bahia (1999), Brasil

Universidade do Estado da Bahia.

Maria Cristina Martins Penido\_\_\_\_\_

Doutora em Educação pela Universidade de São Paulo (1995), Brasil

Universidade Federal da Bahia.

Maxwell Roger da Purificação Siqueira\_\_\_\_\_

Doutor em Educação (ensino de Física e Matemática) pela Faculdade de Educação da USP, Brasil, Universidade Estadual de Santa Cruz.

## Resumo

Este trabalho tem como objetivo investigar a apropriação do princípio da incerteza por estudantes de Química no contexto do ensino do modelo atômico quântico. Adotamos como referenciais teóricos: a formação de conceitos de acordo com a teoria histórico-cultural, para compreender as etapas do desenvolvimento do pensamento dos indivíduos, e a formulação histórica do princípio da incerteza por Werner Heisenberg, que forneceu os elementos do sistema conceitual a ser apropriado. A pesquisa foi elaborada de modo qualitativo, em uma turma do curso de Química de uma universidade brasileira, no 1º semestre de 2016. A coleta de dados foi realizada por meio de um questionário de conhecimentos prévios ao ensino e de duas avaliações de aprendizagem, além da gravação das aulas em áudio e vídeo. Analisamos o conteúdo das respostas produzidas pelos estudantes buscando identificar os elementos do sistema conceitual do princípio da incerteza presentes, bem como os tipos de termos usados para exprimi-los. Os resultados possibilitam concluir que os estudantes desenvolveram o pensamento conceitual no decorrer das aulas e, ao mesmo tempo, substituíram as expressões não científicas iniciais por termos científicos. Verificamos, ainda, dificuldades na apropriação de alguns conceitos do sistema, assim como, falta de coerência em parte das respostas. Tais fatos sugerem que esses aspectos mais difíceis do conceito do princípio da incerteza merecem maior atenção durante o ensino. Este trabalho abre perspectivas para outras investigações, indicando a possibilidade da continuidade do trabalho.

**Palavras-chave:** Princípio da incerteza; Teoria histórico-cultural; Conceito; Modelo atômico quântico; Formação do professor de Química.

## ABSTRACT

The objective of this work is to investigate the appropriation of uncertainty principle by Chemistry students during the quantum atomic model teaching. We took as theoretical basis: concept formation as described by historical-cultural theory, to comprehend development steps of individual thinking, and historical formulation of uncertainty principle by Werner Heisenberg, that provided the elements of conceptual system to be appropriated. Research was elaborated in a qualitative way, in a class of Chemistry course of a Brazilian university, during first semester of 2016. Data were collected by means of a questionnaire about students' knowledge prior to teaching and of two learning evaluations, and by audio and video recording of classes. We analyzed the content of answers produced by students searching for identify the elements of conceptual system of uncertainty principle present, as well as type of terms used to express them. Results make possible conclude that students developed conceptual thinking along the classes and, at same time, changes nonscientific expressions by scientific terms. Yet, we verified difficult in appropriation of some system concepts, as lack of coherence in part of the answers. Such facts suggest that the more difficult aspects of the uncertainty principle concept deserve more attention during teaching. This work open prospects to another researches, pointing to possibilities of work continuity.

**Keywords:** Principle of uncertainty; Historical-cultural theory; Concept; Quantum atomic model; Teacher training in chemistry.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Fotografia de trajetória (trilha) de elétron em uma câmara de nuvem	21
Figura 2	Representação do Efeito Compton com um elétron em um átomo	25
Figura 3	Microscópio de Heisenberg	25
Figura 4	Nuvem eletrônica do átomo	28
Figura 5	Diagrama conceitual Princípio da incerteza	29
Figura 6	Representação do ciclo básico da investigação	30

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>O DESENVOLVIMENTO INTELECTUAL SEGUNDO A TEORIA HISTÓRICO CULTURAL</b>	<b>12</b>
<b>3</b>	<b>O PRINCÍPIO DA INCERTEZA NO CONTEXTO DO MODELO ATÔMICO</b>	<b>19</b>
3.1	A quantização da energia	19
3.2	O Problema de Heisenberg e sua abordagem	20
3.3	Explicação qualitativa do princípio da incerteza	22
3.4	Indeterminação das trajetórias dos elétrons no átomo	27
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>30</b>
4.1	TIPO DE PESQUISA	30
4.2	CONTEXTO DA PESQUISA	32
<b>4.2.1</b>	<b>A disciplina</b>	<b>32</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Turma 2016.1</b>	<b>32</b>
<b>4.2.3</b>	<b>O professor</b>	<b>33</b>
<b>4.2.4</b>	<b>Planejamento de Ensino</b>	<b>33</b>
<b>4.2.5</b>	<b>Instrumentos de Coleta de Dados</b>	<b>35</b>
4.2.5.1	Questionário de conhecimentos prévios	35
4.2.5.2	Filmagens e Observações	36
4.2.5.3	Prova e Exercícios	36
4.3	Metodologia de análise dos Dados	40
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>42</b>
5.1	Estado de desenvolvimento prévio ao ensino	42
<b>5.1.1</b>	<b>Sentido geral do princípio da incerteza</b>	<b>42</b>

5.1.2	<b>Grandezas do movimento às quais a incerteza se aplica</b>	44
5.1.3	<b>Relação entre incerteza e simultaneidade da medida</b>	45
5.1.4	<b>Interferência da medida como causa da incerteza dos resultados</b>	46
5.1.5	<b>Relação formal entre incerteza das grandezas</b>	47
5.1.6	<b>Ente em movimento</b>	48
5.1.7	<b>Respostas Incoerentes</b>	49
5.2	Análise das provas	52
6	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	60
7	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	62
8	<b>APÊNDICES</b>	66
9	<b>ANEXOS</b>	70
9.1	Anexo A	70
9.2	Anexo B	73
9.3	Anexo C	73



## 1 INTRODUÇÃO

A elaboração deste trabalho tem como justificativa para o meio acadêmico as seguintes razões: o ensino do modelo atômico quântico, que tem papel de grande importância nas explicações da química, além de um instrumento do pensamento químico na atualidade; As orientações curriculares para o ensino demonstram que o modelo atômico quântico é de suma importância para a compreensão do comportamento das partículas subatômicas por meio das leis da Física moderna que apresenta fundamentação diferente da Física clássica; a Teoria Quântica traz o conceito do princípio da incerteza de Heisenberg que é imprescindível para o estudo do modelo atômico quântico, por implicar na indeterminação de trajetórias dos elétrons em volta dos núcleos atômicos e assim possibilita a passagem do modelo atômico de Bohr ao modelo de orbitais.

Em 2012, iniciamos nossa investigação em ensino de química quântica com a elaboração do trabalho de conclusão de curso intitulado: *O Modelo Atômico (didático) de Bohr-Heisenberg* no qual investigamos o ensino do conceito de átomo na educação básica por meio dos modelos atômicos e a relação com os conceitos da mecânica quântica, em especial, o princípio da incerteza de Heisenberg e sua importância na compreensão do modelo atômico de orbitais (SANTOS, 2013).

A investigação demonstrou que o ensino do modelo atômico costuma seguir uma sequência temporal de apresentação dos modelos na seguinte ordem: modelo de Dalton, modelo de Thomson, modelo de Rutherford, modelo de Bohr, modelo de orbitais. Ao analisarmos os livros didáticos de química para o ensino médio que abordam os modelos atômicos, verificamos que alguns deixam de lado o modelo atômico dos orbitais (ou modelo atômico quântico) e os conteúdos necessários à sua compreensão (SANTOS 2013).

A importância do ensino do modelo de orbitais no ensino médio de química está ligada à sua ampla utilização nas explicações químicas e, por isso, ser um instrumento importante do pensamento químico atual. Nossa posição foi corroborada pelas Orientações Curriculares para o Ensino Médio

que apontam o “reconhecimento do modelo quântico do átomo como interpretação do comportamento das partículas atômicas a partir de leis da Física moderna, fundamentada em princípios diferentes dos previstos pela Física clássica”. (MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO, 2006).

Para a compreensão do modelo atômico de orbitais é necessário o ensino de conceitos básicos da teoria quântica, entre os quais o princípio da incerteza que, tomado numa perspectiva realista, indica a impossibilidade de se conhecer a trajetória de entes quânticos, tais como elétrons, átomos e moléculas. O princípio da incerteza implica na indeterminação de trajetórias dos elétrons em volta dos núcleos atômicos e, por isso, contribui para a passagem do modelo atômico semiclássico de Bohr ao modelo dos orbitais. Contudo, ao analisarmos os livros didáticos de química para o ensino médio aprovados no PNLD 2012, constatamos que apenas dois livros, entre cinco, discutem o princípio da incerteza, porém, sem estabelecer um vínculo claro com o modelo atômico (SANTOS, 2013; SANTOS; SILVA, 2014).

Embora o ensino do modelo quântico do átomo abra possibilidades de interdisciplinaridade do ensino de química com o ensino da física moderna, os trabalhos sobre este tema não costumam estabelecer relação com o princípio da incerteza (por exemplo: MOURA; GUERRA, 2013; RAMIREZ; BADILLO; MIRANDA, 2010). As investigações sobre o ensino do princípio da incerteza também não o relacionam ao modelo atômico (por exemplo: STUART Jr.; ZULIANI, 2012).

Os resultados do trabalho de conclusão de curso e a revisão da literatura nos chamaram a atenção para o fato de que o princípio da incerteza é pouco estudado pelos químicos. Em vista deste problema direcionamos nossa investigação para o ensino universitário e a formação dos futuros professores de química, com a seguinte questão de pesquisa: **como estudantes da licenciatura em química se apropriam do princípio da incerteza no contexto do ensino do modelo atômico quântico durante a sua formação?**

Tal questão levou ao seguinte objetivo: **Investigar como estudantes da licenciatura em química se apropriam do princípio da incerteza no contexto do ensino do modelo atômico quântico durante a sua formação.**

Os capítulos seguintes apresentam o desenvolvimento do estudo na seguinte ordem: Referencial teórico - A teoria histórico-cultural e o princípio da incerteza; A metodologia; Os resultados e discussões e as considerações finais.

O capítulo 2 trata da fundamentação teórica, no qual discutimos o desenvolvimento intelectual do indivíduo segundo a teoria histórico cultural. A teoria apresenta as etapas do desenvolvimento intelectual considerando os conhecimentos aprendidos por meio das relações sociais e a vivência no âmbito escolar, o qual se divide em estágios: pensamento sincrético, pensamento por complexos e o pensamento por conceitos. Tais conceitos são apresentados por Vigotski (2001) na obra: *A construção do pensamento e da linguagem*, onde o autor descreve cada passo percorrido pelo indivíduo. O pensamento sincrético é constituído de um emaranhado de informações que não apresentam definição específica sobre os objetos. No pensamento por complexo, o indivíduo está apto a realizar vínculos, com os objetos, ocorrendo o desenvolvimento da abstração associada à linguagem. O pensamento conceitual é caracterizado pela aprendizagem através da experiência e por meio da abstração. Neste estágio o indivíduo pode aprender conceitos de modo espontâneo ou científico.

O capítulo 3 também se refere à fundamentação teórica abordando o princípio da incerteza no contexto do modelo atômico. Por meio dos conceitos oriundos da teoria quântica iniciada por Max Planck e seguida por Albert Einstein e outros, apresenta os princípios que fundamentam o modelo atômico quântico. Dentre estes encontramos o princípio da incerteza desenvolvido por Heisenberg, o qual indica a impossibilidade de se determinar para entes quânticos, a posição e o momento de forma simultânea, devido a interação do instrumento de medida com o corpo durante o processo, o que produz incerteza na medida. O conceito proposto por Heisenberg fornece embasamento para analisar os dados obtidos durante a investigação em paralelo com a teoria histórico-cultural.

O capítulo 4 apresenta a metodologia onde descrevemos as etapas da investigação. A pesquisa foi desenvolvida na Universidade Federal da Bahia durante o semestre 2016.1, na disciplina Química Quântica I, que integra o

currículo do curso de Licenciatura em Química. A turma formada para o semestre apresentava 32 estudantes. O professor da disciplina possuía experiência por tê-la lecionado em semestres anteriores.

O planejamento para o ensino do conteúdo foi elaborado pelo professor. No início das aulas da disciplina Química Quântica I, aplicou-se um questionário de conhecimentos prévios para indicar o estado inicial de desenvolvimento dos estudantes. No decorrer do semestre foram realizadas três provas pelo professor. A primeira prova apresentava conteúdos que faziam parte da nossa pesquisa, assim observamos neste período o comportamento dos estudantes durante as aulas. A segunda prova forneceu dados por meio das respostas dos estudantes e também obtivemos dados da prova da terceira unidade. Além das provas, utilizamos como instrumento de coletas de dados imagens em vídeo das aulas. Os dados foram analisados por análise de conteúdo.

O capítulo 5 é composto pelos resultados e pelas discussões elaborados por meio da análise das respostas dos estudantes. Para os resultados obtidos por análises das respostas foram construídos quadros que indicam qual o tipo de conceito — científico ou expressões sinônimas — eram empregados pelos estudantes nas suas resoluções. Por meio dos vídeos foi possível avaliar se algum conceito deixou de ser utilizado pelo professor durante as aulas do conteúdo.

O capítulo 6 abrange as considerações finais, onde é descrito um resumo dos resultados de modo a responder a questão de pesquisa e demonstrar que os objetivos foram atingidos. Nesse capítulo são, também, propostas ações para aprimorar a aprendizagem do conceito como: análise textual para examinar a articulação dos conceitos; elaboração de material didático para o ensino do princípio da incerteza no nível superior e no nível médio; e a pesquisa de outros aspectos do modelo atômico quântico que possibilitem melhor compreensão deste, como o ensino da equação de Schroedinger.

## **2- O DESENVOLVIMENTO INTELECTUAL SEGUNDO A TEORIA HISTÓRICO-CULTURAL**

O desenvolvimento intelectual de um indivíduo tem início desde o seu nascimento por meio da contribuição de outros indivíduos que estão à sua volta. O nascimento de qualquer indivíduo acontece dentro de um convívio social e desde criança, seus familiares, os amigos, os professores e outras pessoas com quem tenha contato, lhe transmitem conhecimentos provindos do cotidiano e das normas da vida em sociedade, ou seja, desde cedo lhe são transmitidos traços da sua cultura. A aprendizagem de informações culturalmente estabelecidas enriquece as experiências do indivíduo e lhe modifica o intelecto.

Cada um dos grupos sociais citados acima assume funções diferentes no desenvolvimento intelectual do indivíduo e de modos diversos. Os conteúdos contidos nas informações são expostos ao indivíduo por meio de gestos, fala ou escrita. Por exemplo, quando um adulto deseja demonstrar a uma criança pequena um objeto, inicialmente aponta o local onde este está localizado e apresenta a sua descrição ou simplesmente a sua denominação. Este processo, ao ser repetido algumas vezes, cria na criança uma relação entre o objeto e sua descrição, ou seja, a criança memoriza a operação realizada e a replica em outras situações passando de um estágio de desenvolvimento a outro. Em resumo, a demonstração do objeto que era feita apenas pelo adulto agora também é feita pela criança. Este processo é denominado internalização, a qual consiste na “reconstrução interna de uma operação externa” (VIGOTSKI, 2010, p. 56). Logo, cada situação vivida pelo indivíduo poderá ser reconstruída internamente em sua consciência levando a uma série de transformações que promovem seu desenvolvimento intelectual.

O desenvolvimento intelectual de um indivíduo ocorre em três estágios: pensamento sincrético, pensamento por complexos e o pensamento por conceitos. Os estágios de desenvolvimento do pensamento segundo a teoria histórico-cultural são apresentados por Vigotski (2001) em sua obra *A construção do pensamento e da linguagem*.

No primeiro estágio, o pensamento sincrético é caracterizado por um emaranhado de informações que ainda não apresentam relações claras entre os significados dos objetos. Neste ponto, o indivíduo, apresenta um vocabulário suficiente para que possa haver compreensão entre as partes durante a comunicação, contudo os significados das palavras divergem entre a criança e o adulto. As palavras utilizadas por um adulto e copiadas por uma criança têm a função de representar um mesmo grupo de objetos, porém a criança percebe os sentidos das palavras de modo completamente diferente.

No segundo estágio, o pensamento por complexos, o indivíduo é capaz de formar vínculos entre os objetos, agrupá-los e estabelecer relações concretas entre um grupo e os integrantes deste grupo. Neste estágio os significados das palavras da criança se aproximam dos significados das palavras para o adulto. O emprego das palavras por uma criança leva paulatinamente ao domínio do pensamento abstrato. A palavra é a base para a fluidez deste estágio, sendo aplicada e usada de modos diversos, o que possibilita ao indivíduo realizar sintetização e simbolização em direção ao conceito abstrato.

O processo de abstração vinculado à palavra possibilita a distinção entre o pensamento por complexos e o pensamento por conceitos. Esta mudança de estágio acontece durante a adolescência, quando as formas primitivas de pensamento – sincrético e por complexo – passam para o segundo plano. O processo de mudança de uma forma de pensar para outra, não ocorre de forma simples e direta. Mesmo tendo aprendido a utilizar o pensamento por conceitos, o adolescente não abandona as outras formas de pensamento mais elementares. O indivíduo na fase da adolescência, ao utilizar uma palavra, a aplica como um conceito, contudo a define como um complexo, caracterizando uma fase de transição. Em outras palavras, suas expressões verbais não se distinguem daquelas de outros indivíduos que utilizam pensamento conceitual, contudo quando lhes são questionados sobre a definição do conceito estes utilizam exemplos para explicá-los. Na passagem para a fase adulta o indivíduo terá superado as dificuldades encontradas durante a transição entre os estágios de pensamento e chegará ao nível de abstração dos conceitos.

A formação de conceitos transcorre por meio do desenvolvimento da abstração, durante o qual o indivíduo se afasta dos objetos concretos para operar com as palavras. No estágio de pensamento conceitual o indivíduo poderá apreender novos conceitos por meio da abstração de experiências concretas e também será capaz de obter conhecimentos que só são possíveis de serem apreendidos por intermédio da comunicação simbólica abstrata. Por exemplo, o princípio da incerteza de Heisenberg, conceito que é estudado de forma teórica por não apresentar experiência concreta para sua compreensão. De fato, as experiências de pensamento apresentadas na sua exposição (ver adiante) são modos de aproximar o conceito de situações concretas e facilitar seu entendimento.

O pensamento conceitual pode ser descrito em termos de conceitos espontâneos e científicos (VIGOTSKI, 2001). Os conceitos espontâneos são desenvolvidos por meio das experiências do indivíduo em seu meio social. No pensamento espontâneo o indivíduo apropria-se de elementos que constituem um conceito por meio da percepção da experiência. Estes elementos percebidos, mas, pouco sistematizados e não verbalizados serão utilizados para reconhecer situações similares ou análogas vividas durante o convívio social nas quais os conceitos aprendidos de modo espontâneo poderão ser utilizados.

Neste ponto, o indivíduo é capaz de realizar qualquer atividade que lhe foi ensinada pela experiência, mas não sabe explicar de modo sistemático o significado da atividade. Por mais que a ação do indivíduo seja consciente sua atenção está voltada para o ato de realizar a atividade e não para o seu significado (VIGOTSKI, 2001). Por exemplo, ao perguntarmos a um pedreiro como se realiza a construção de uma parede de tijolos, este descreveria as etapas do processo de forma consciente, porém ao ser questionado sobre o porquê de cada etapa ele não saberá explicar, pois seu aprendizado ocorreu de forma espontânea e com os anos de experiência seu conhecimento sobre construção foi sendo aprimorado visando à execução da atividade. e não, à justificativa da maneira como esta é realizada.

Em vista de a aprendizagem ter ocorrido de forma espontânea o indivíduo sabe aplicar o conceito, contudo tem dificuldade em explicá-lo e em justificar o seu emprego (VIGOTSKI, 2001).

Por outro lado, o indivíduo aprende o conceito científico de forma sistemática, o que lhe possibilita aplicar de forma voluntária os conceitos que lhe são apresentados, sendo capazes de transpor estes conhecimentos para outras situações sobre as quais sejam questionados. Por exemplo, para o ensino sistemático da construção de uma parede o aprendiz deve utilizar uma mistura de areia, arenoso, cimento e água, em determinadas proporções, que juntos formarão a argamassa que dará sustentação aos blocos da parede. Esta argamassa deve ter uma consistência adequada — nem uma mistura com consistência líquida, nem uma mistura enrijecida — caso contrário, não será possível o equilíbrio de um bloco sobre o outro. Para a execução da atividade utilizam-se ferramentas como: linha de náilon para construção, que auxilia no alinhamento dos blocos da parede na direção horizontal ao serem colocados um após o outro com a argamassa; prumo de pedreiro, que auxilia na verificação do alinhamento vertical dos blocos na parede; colher de pedreiro, confeccionada em aço e madeira, empregada na aplicação da argamassa aos blocos a serem assentados um após o outro ou um sobre o outro na construção.

O profissional da construção civil que desenvolveu seu pensamento por conceito de forma científica ao ser questionado sobre a construção de uma parede de tijolos expressaria uma resposta composta por elementos contidos no exemplo anterior. Em vista de a aprendizagem ter ocorrido de forma científica o indivíduo sabe explicar e justificar o conceito, além de aplicá-lo (VIGOTSKI, 2001).

Por mais que o desenvolvimento dos conceitos de forma espontânea ou científica aparentem divergência, o estágio do pensamento por conceito está vinculado a ambas as formas de pensamento, visto que estes tipos de conceitos não se encontram isolados dentro da consciência do indivíduo. O progresso de um tipo de conceito tende a influenciar o outro através de interação constante, como pode ser compreendido pelo exemplo da construção de uma parede de tijolos: o indivíduo que tem seu aprendizado de modo



espontâneo é capaz de cumprir com a atividade, contudo nada impede que este venha a ampliar seus conhecimentos ao ponto de alcançar o aprendizado de modo científico e consiga explicar e justificar o porquê de cada ação.

Ao aprender os conceitos de modo científico, o indivíduo terá a capacidade de explicá-los e empregá-los de maneira justificada. Neste momento, o indivíduo estará no nível de tomada de consciência no qual conseguirá empregar o conceito em outras situações.

Na nossa pesquisa tratamos do conceito do princípio da incerteza de Heisenberg que, como dito anteriormente, só pode ser compreendido de modo teórico por não apresentar uma experiência concreta. Logo a aprendizagem do conceito só será possível por meio da abstração.

A aprendizagem do princípio da incerteza está vinculada a colaboração do professor nas aulas e a fatores externos, como estudos anteriores, que os estudantes possam ter vivenciado. O processo de aprendizagem pode vir a contribuir para o desenvolvimento intelectual dos estudantes com dependência de como ocorre à instrução do conceito a ser aprendido.

A instrução realizada de modo adequado, desperta para a vida, organiza e guia o processo de desenvolvimento, (VIGOTSKI, apud PRESTES, 2012). A instrução não garante que irá ocorrer desenvolvimento, mesmo sendo realizada em uma ação colaborativa com o professor, porém, cria possibilidades para o desenvolvimento (PRESTES, 2012).

A relação entre a instrução e o desenvolvimento intelectual do indivíduo foram discutidos por Vigotski através do conceito de *zona blijaichego razvitia* que ao ser traduzido para o português, seguindo as traduções norte-americanas, é zona de desenvolvimento proximal. O tradutor Paulo Bezerra apresenta outra tradução: zona de desenvolvimento imediato. Ambas as traduções apresentam problemas para o que Vigotski pretende introduzir com o conceito de *zona blijaichego razvita*. As palavras proximal e imediato não transmitem a importância existente no conceito e sua relação com o desenvolvimento, a instrução e a ação colaborativa de outra pessoa (PRESTES, 2012).

O conceito de *zona blijaichego razvitia* pode ser definido por:

distância entre o nível do desenvolvimento atual da criança, que é definido com a ajuda de questões que a criança resolve sozinha, e o nível de desenvolvimento possível da criança, que é definido com a ajuda de problemas que a criança resolve sob a orientação dos adultos e em colaboração com companheiros mais inteligentes. [...] A *zona blijaichego razvitiia* define as funções ainda não amadurecidas, mas que encontram-se em processo de amadurecimento, as funções que amadurecerão amanhã, que estão hoje em estado embrionário (VIGOTSKI, apud PRESTES, 2012, p. 204)

A tradução que mais se assemelha ao conceito de *zona blijaichego razvitiia* seria zona de desenvolvimento iminente, por caracterizar as possibilidades de desenvolvimento frente ao imediatismo e a obrigatoriedade de ocorrência. Temos que o indivíduo pode não contar com a colaboração de outros durante a vida para que ocorra o desenvolvimento de funções intelectuais, porém mesmo que haja a presença de colaboradores nada garante que as funções intelectuais serão desenvolvidas.

A zona de desenvolvimento iminente corresponde ao estágio do desenvolvimento no qual o indivíduo está na iminência do pensamento, ou seja, a partir deste ponto e com o auxílio de um professor, pode realizar atividades que antes não fazia sozinho. Cada novo conhecimento introduzido que modifica a zona de desenvolvimento iminente contribui para a expansão do nível de desenvolvimento atual do indivíduo (VIGOTSKI, apud. PRESTES, 2012).

A instrução do conceito do princípio da incerteza ocorre por meio da introdução de um sistema conceitual, visto que um conceito não existe de forma isolada, são constituídos da união de outros conceitos. A união de um conjunto de conceitos ou formação de um sistema conceitual acontece por meio de uma via psicológica que possibilita estabelecer vínculos de “dependência e relações entre os objetos representados no conceito e a realidade restante” (VIGOTSKI, 2001).

O sistema conceitual é constituído por intermédio de relações de generalização que foram representadas por Vigotski com o artifício da metáfora do globo terrestre. Nesta experiência metafórica, temos que a superfície terrestre representa a diversidade de realidade, na qual estão contidos os conceitos nos pontos demarcados pelos valores de longitude e latitude.

A latitude para um conceito caracteriza a posição do conceito em relação aos polos do pensamento concreto e abstrato. Logo, na concepção da teoria histórico-cultural, a simbologia do mapa está relacionada com o pensamento conceitual científico que se distancia das experiências, enquanto o pensamento espontâneo está associado à experiência concreta vivida.

A longitude designa o lugar que um conceito ocupa entre outros conceitos dentro de uma mesma latitude — mesmo grau de concretude/abstração — e que expressam outras características da realidade.

Um ponto sobre a superfície desse globo da realidade, assinalado por um par de coordenadas — um valor de latitude e outro de longitude — indica a medida de generalidade do conceito a que se refere, caracterizada pelo grau de abstração/concretude envolvido no pensamento correspondente e pelo objeto que o conceito representa.

As relações de generalização entre os conceitos expostas por meio da metáfora do globo terrestre, podem ser representadas por um diagrama de termos conceituais dispostos em níveis, sendo que, os distribuídos no topo caracterizam o pensamento abstrato e os distribuídos mais abaixo caracterizam o pensamento concreto. Os conceitos científicos por serem constituídos por um número maior de generalizações que os conceitos espontâneos estarão localizados na parte superior do diagrama.

Um diagrama deste tipo, também conhecido como mapa conceitual (BELLAS; GONZALEZ; SILVA, 2015), possibilita visualizar os elementos do sistema conceitual como um todo e de modo sintético, contribuindo para o seu entendimento. Na próxima seção apresentamos um diagrama para o sistema conceitual do princípio da incerteza (Figura 5).

A investigação foi conduzida com estudantes universitários durante uma disciplina que trata do conceito do princípio da incerteza de Heisenberg dentre outros conceitos da teoria quântica. Por estes estudantes estarem dentro da academia esperamos que tenham atingido o estágio de desenvolvimento do pensamento por conceito de modo científico, uma vez que trilharam todo o caminho da educação básica que inicia o indivíduo nos sistemas de conceitos científicos. Dessa maneira buscamos **investigar como estudantes da**

## **licenciatura em química se apropriam do Princípio da Incerteza no contexto do ensino do modelo atômico quântico durante a sua formação.**

A teoria de Vigotski exposta acima terá fundamental importância para a investigação, pois está fornece fundamentação teórica para a análise dos dados obtidos durante a pesquisa de modo a alcançar nosso objetivo.

### **3 - O PRINCÍPIO DA INCERTEZA NO CONTEXTO DO MODELO ATÔMICO**

#### 3.1 A quantização da energia

A teoria quântica nasceu do trabalho de Max Planck sobre a radiação do corpo negro. Em suas pesquisas Planck buscava determinar a expressão que representasse os dados experimentais referentes à intensidade de energia emitida ou absorvida pelo corpo negro em relação ao comprimento de onda da luz. Para obter sua expressão Planck considerou que um corpo negro era constituído por um conjunto de osciladores elétricos que interagem com a radiação eletromagnética. A energia de cada oscilador estaria dividida em partes finitas que seriam proporcionais à sua frequência de oscilação,  $\nu$ , de modo que

$$\varepsilon = h\nu \quad (1)$$

onde  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  J.s foi posteriormente denominada constante de Planck.

A proposição de valores discretos de energia veio de encontro à mecânica clássica, a qual considerava que todos os sistemas apresentavam valores contínuos de energia. A descontinuidade da energia proposta por Planck foi o primeiro grande passo para o nascimento da teoria quântica (PESSOA JR, 2006; STUDART, 2000).

Em 1905, a constante de Planck foi novamente mencionada no meio científico no artigo de Albert Einstein intitulado: *Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da produção e da transformação da luz*, no qual Einstein apresentou um modelo quântico para a luz. Baseado na ideia de descontinuidade da energia, Einstein propôs que o raio de luz seria quantizado. O novo modelo para a luz introduziu a ideia de *quantum*, que em latim, significa

quantidade. Esta quantidade de energia é fixa para cada valor de frequência da luz e não pode ser decomposta em frações menores. O modelo quântico da luz possibilitou a explicação do efeito fotoelétrico.

Em 1913, a quantização de energia foi utilizada por Neils Bohr para explicar os espectros atômicos de emissão e absorção para o átomo de hidrogênio. Bohr desenvolveu um modelo que buscou aprimorar o modelo atômico de Rutherford em relação à estabilidade, incorporando o conceito de quantização da energia. Para tanto, postulou que os elétrons descrevessem movimentos em órbitas estacionárias, afastadas a distâncias fixas do núcleo atômico, nos quais possuíam energia definida e sem irradiação durante o movimento (PESSOA JR., 2006).

### 3.2 O Problema de Heisenberg e sua abordagem

Os trabalhos de Rutherford, Bohr e outros, baseados num modelo planetário do átomo, produziram resultados importantes, tanto do ponto de vista químico quanto espectroscópico. Porém, nestes trabalhos existe uma forte tendência em caracterizar as trajetórias dos elétrons ao redor do núcleo atômico. Para Heisenberg “a dissimilaridade fundamental entre o espectro atômico e o espectro clássico de um sistema de elétrons impõe a necessidade de abandonar o conceito de um caminho eletrônico e renunciar a uma descrição visual do átomo” (HEISENBERG, 1933, p. 291).

Para Heisenberg (1996, p. 94), a mecânica quântica não admitia os conceitos de trajetórias ou de órbitas de um elétron, de modo que, a percepção visual considerada como a trajetória de um elétron numa câmara de nuvem não tinha explicação:

Eu queria partir do fato de que a mecânica quântica, tal como a conhecíamos na época, já impunha uma interpretação física singular de certas grandezas que nela ocorriam — por exemplo, os valores médios da energia, do momento elétrico, do impulso, das flutuações etc. — de modo que era como se já não tivéssemos nenhuma liberdade no que dizia respeito a essa interpretação. Em vez disso, teríamos que procurar deduzir a interpretação geral correta através da estrita lógica, a partir da interpretação especial que estava à mão (Heisenberg, 1996, p. 94).

Tal entendimento tornou-se um problema para Heisenberg, que para fundamentar seus questionamentos passou a avaliar o experimento da câmara de nuvens criada por Charles Wilson em 1911.

Wilson inspirou-se no fenômeno da formação de nuvens na atmosfera: uma massa de ar saturada por vapor d'água é carregada atmosfera acima por meio das correntes de convecção e é submetida a uma expansão adiabática com redução da temperatura. Desse modo, a abundante quantidade de vapor d'água se separa na forma de gotas de água levando à formação das nuvens (GUPTA; GHOSH, 1946). O instrumento desenvolvido por Wilson operava de modo semelhante ao descrito acima, no qual um volume fixo de gás era saturado por um vapor, ou uma mistura de vapores, e sofria expansão abrupta, adiabática. Obtinha-se um gás que apresentava uma temperatura mais baixa e com concentração de vapor d'água maior do que existia no estado saturado, ou seja, um gás supersaturado. Quando íons ou partículas carregadas atravessavam a câmara, criavam perturbações nas moléculas do gás e o vapor se condensava em gotículas de água nos pontos pelos quais passavam, de modo que, descreviam suas trajetórias. A Figura 1 ilustra o percurso de um elétron numa câmara de nuvem.

Figura 1 - Fotografia de trajetória (trilha) de elétron em uma câmara de Wilson



Fonte: Wilson, 1927, p. 201.

Ao observar o experimento da câmara de Wilson, Heisenberg se questionava sobre se o que realmente estava observando era verdadeiramente a trajetória do elétron e outras partículas ou muito menos do que se pensava. O resultado do experimento se caracterizava apenas por uma série de pontos distintos, pelos quais o elétron haveria passado. Logo, o que realmente se

observava na câmara eram gotículas de água isoladas que por sua vez são muito maiores que os elétrons. Ao refletir sobre o experimento da câmara de Wilson, Heisenberg reforçou seus questionamentos sobre o caminho do elétron e a descrição visual do átomo.

A partir desta constatação, reformulou suas questões de pesquisa: em lugar de perguntar como calcular a trajetória do elétron por meio da mecânica quântica, questionou-se:

Pode a mecânica quântica representar o fato de que um elétron se encontra aproximadamente (ou seja, com uma certa imprecisão) num determinado lugar e se move aproximadamente (de novo, com uma certa imprecisão) com determinada velocidade? Podemos tornar essas aproximações tão estreitas que elas não provoquem dificuldades experimentais? (HEISENBERG 1996, p. 95-96).

Heisenberg desenvolveu formalmente tais ideias na formulação que ficou conhecida como **princípio da incerteza** da mecânica quântica, segundo o qual “o produto das incertezas dos valores medidos do momento (isto é, o produto da massa pela velocidade) e da posição, não pode ser inferior à constante de Planck, ou um *quantum* de ação” (HEISENBERG, 1996, p. 96). Deste modo, a expressão matemática do princípio da incerteza dada pela inequação [1]:

$$\Delta p_x \Delta x \geq \hbar / 2 \quad (2)$$

na qual  $\hbar = h / 2\pi$ , sendo  $h$  a constante de Planck.

### 3.3 Explicação qualitativa do princípio da incerteza

A determinação da trajetória de um corpo requer medidas da sua posição e momento, o que implica na interação do corpo com o instrumento de medida. Para um melhor esclarecimento dessa interação, serão explicitadas duas experiências de pensamento: a primeira, acerca da determinação da trajetória

---

[1] Esta inequação deve ser considerada como uma relação de incerteza, pois é uma expressão particular do princípio da incerteza para o caso das grandezas posição e momento de um ente quântico. O princípio da incerteza, segundo Pessoa Jr. (2003, p. 77), “exprime o fato de que uma maior previsibilidade nos resultados da medição de um dos observáveis [grandeza não compatíveis, cujos operadores não comutam] implica uma diminuição na previsibilidade do outro”. Empregaremos o termo princípio da incerteza por ser mais comum no ensino de Química que relação de incerteza.

de um corpo (clássico) e, a segunda, acerca da determinação da trajetória de um corpúsculo quântico.

Para determinarmos a trajetória de um corpo devemos avaliar: (a) sua posição no espaço em dado instante do movimento; (b) sua velocidade no mesmo instante; (c) as forças que atuam sobre o corpo.

Na primeira experiência de pensamento discutiremos a determinação da trajetória para um determinado corpo segundo a mecânica clássica. Os cálculos serão limitados ao movimento em uma só dimensão, para simplificação, porém, a ideia é facilmente generalizável.

Ao descrever o movimento de um corpo temos que considerar inicialmente um referencial. Definir a localização de um objeto significa determinar sua posição em relação a um ponto de referência, que denominamos de origem de um eixo  $x$ . Logo, a posição de uma partícula em movimento no instante  $t$  é descrita pela abscissa correspondente,  $x(t)$ .

Para realizarmos as medidas de  $x(t)$  e determinarmos a posição no espaço onde o corpo se encontra devemos lançar em direção ao corpo fótons que serão refletidos e alcançarão nossos olhos (ou um aparelho): então, veremos o objeto em sua posição. O deslocamento do corpo é dado por sua mudança de posição,  $\Delta x = x(t_2) - x(t_1)$ , a qual pode ser obtida por meio de duas medidas de posição no intervalo de tempo,  $\Delta t = t_2 - t_1$ .

A velocidade instantânea do corpo pode ser determinada por meio dos valores de  $\Delta x$  medidos ao considerarmos  $\Delta t$  suficientemente pequeno, ou seja,  $\Delta t$  tendendo a zero ( $\Delta t \rightarrow 0$ ). A aceleração que pode ocorrer durante o movimento, se deve à aplicação de forças sobre o corpo.

A obtenção do valor da função que descreve os movimentos do corpo depende do conhecimento dos valores de posição inicial e velocidade inicial,  $x(t_0)$  e  $v(t_0)$ , a partir dos quais são calculados os diversos  $x(t)$  por meio da equação:

$$x(t) - x(t_0) = v_0(t - t_0) + \int_{t_0}^t \int_{t_0}^{t'} a(t'') dt'' dt' \quad (3)$$

$$v(t) = v(t_0) + \int_{t_0}^t a dt' \quad (4)$$

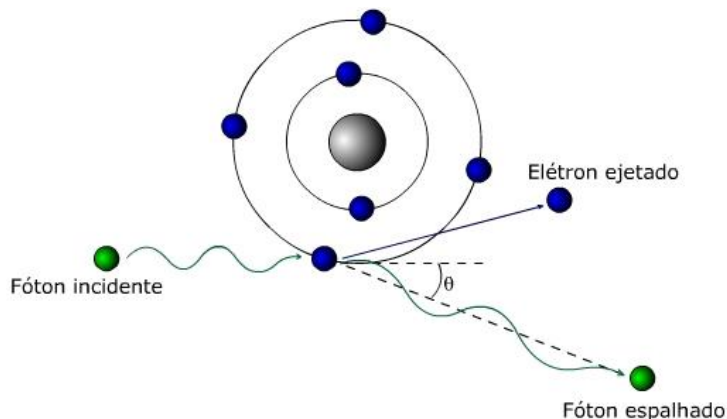


Nesta experiência de pensamento, a energia dos fótons utilizados nas medidas de  $x(t_0)$  e  $v(t_0)$  é muito pequena em relação à energia do corpo macroscópico, de modo que, a realização das medidas não provoca desvios em sua trajetória (HEISENBERG, 1933).

Na segunda experiência de pensamento será realizada a determinação da trajetória de um corpúsculo quântico (HEISENBERG, 1983, p. 64; BOHR, 1928, p. 63). Para tanto o experimentador olharia através de um microscópio de grande poder resolutivo e veria o corpúsculo em seu percurso. Este microscópio não poderia utilizar luz visível, visto que a resolução na medida da posição do elétron não pode apresentar valor menor que o comprimento de onda da luz. Ao utilizarmos um microscópio com uma fonte luminosa de raios gama, cujo comprimento de onda é menor que o tamanho do átomo, o aparelho se adequaria ao propósito do experimento. Sabe-se que este microscópio ainda não foi construído, o que não nos proíbe de discutir esta experiência.

A energia dos fótons de radiação gama empregados na medição é comparável à energia de corpúsculos tais como elétrons em átomos. Ao lançarmos um fóton sobre um elétron ocorre uma colisão com transferência de energia, o fóton de radiação gama é espalhado e observado através do microscópio. Porém, como a energia do fóton é comparável à energia do elétron, “o primeiro quantum de luz da fonte de luz ao alcançar o elétron e passar para o olho do observador ejetaria o elétron completamente do seu caminho de acordo com as leis do Efeito Compton” (HEISENBERG, W. 1933; p. 292). A Figura 2 ilustra o espalhamento do fóton e a ejeção do elétron de sua trajetória.

Figura 2 – Representação do Efeito Compton em um elétron em um átomo



Fonte: <http://efeitofotoeletricoecompton.webnode.com.br/efeito-compton/>

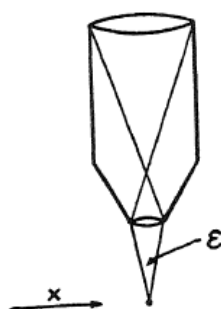
Ou seja: o processo de mediação provoca uma interação que altera a trajetória do elétron, de modo que, a posição do elétron posterior à medida não tem correspondência com sua antiga trajetória.

Para determinar a velocidade do elétron são necessárias duas medidas de posição consecutivas. Como cada medição altera a energia do corpúsculo, a velocidade medida não corresponde à sua velocidade atual.

De modo geral, cada nova medida implica em nova trajetória e nova velocidade para o corpúsculo, de modo que, os valores de  $x_0$  e  $v_0$  que podem ser medidos não correspondem à trajetória que o corpúsculo está realmente percorrendo após as medidas.

A relação de incerteza entre posição e momento pode ser obtida por uma análise ótica do experimento descrito por Heisenberg. Consideremos um corpúsculo que se move na direção  $x$  (Figura 3, abaixo) e a certa distância da objetiva de um microscópio.

Figura 3: Microscópio de Heisenberg



Fonte: Heisenberg, 1949; p. 21.

Emitem-se fótons na mesma direção  $x$ , os quais serão espalhados pelo corpúsculo e passarão pelo microscópio para o olho do observador. Se  $\lambda$  for o comprimento de onda da luz que ilumina o microscópio, a incerteza na medida da coordenada  $x$  é dada poder de resolução da objetiva:

$$\Delta x = \frac{\lambda}{\text{sen } \varepsilon} \quad (5)$$

onde  $\varepsilon$  é o ângulo de abertura da objetiva.

Por meio das colisões com os fótons o elétron sofre uma variação de momento (por efeito Compton) na direção do movimento ( $x$ ) da ordem de,

$$\Delta p_x \approx \frac{h}{\lambda} \text{sen } \varepsilon \quad (6)$$

Donde se deduz que

$$\Delta p_x \Delta x \approx h \quad (7)$$

que é uma expressão semiquantitativa do princípio da incerteza.

Segundo esta expressão, é impossível determinar a posição e o momento de uma partícula simultaneamente com qualquer precisão. Quando o  $\Delta p \rightarrow 0$ ,  $\Delta x \rightarrow \infty$  e vice-versa. Quanto menor a incerteza de uma das variáveis ( $x$  ou  $p$ ), maior a incerteza na outra variável.

O princípio da incerteza expressa a indeterminação de valores simultâneos de momento numa direção e a correspondente posição. Não existe uma restrição na determinação desses valores com extrema exatidão, quando feitos de forma individual. Contudo, ao determinarmos a velocidade para um corpúsculo com exatidão ( $\Delta v_x \rightarrow 0$ ), teremos que sua posição será completamente desconhecida ( $\Delta x \rightarrow \infty$ ).

O desconhecimento de um par de valores de posição e momento (ou posição e velocidade) para um corpúsculo impede que se possa desenvolver uma equação para o cálculo de sua trajetória, a exemplo do que foi feito no caso do movimento de um corpo. Portanto, uma consequência imediata do princípio da incerteza é a indeterminação das trajetórias dos entes quânticos.

### 3.4 Indeterminação das trajetórias dos elétrons no átomo

Na época em que se desenvolvia o princípio da incerteza, vigorava o modelo atômico de Bohr, o qual admitia que os elétrons se moviam em órbitas — trajetórias circulares — em volta do núcleo atômico, com raios ( $r$ ) e velocidades ( $v$ ) bem definidos, dados por:

$$r = k \frac{n^2 \hbar^2}{Ze^2 m} \quad (8)$$

$$v = k \frac{Ze^2}{n\hbar} \quad (9)$$

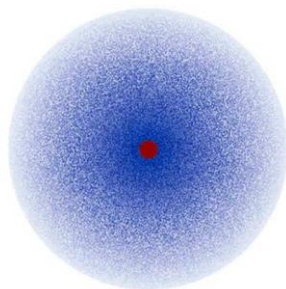
Por meio das equações propostas por Bohr seria possível determinar a trajetória para o elétron no átomo. Contudo, o modelo de Bohr não levava em conta as relações de incerteza de Heisenberg, de modo que, não podia ser considerado uma representação teoricamente adequada, pois as trajetórias dos elétrons não são determináveis.

De acordo com Heisenberg (1983, p. 65) “o termo ‘trajetória’ não possui um significado definível”. Divergimos de tal posição. Entendemos que os entes quânticos, tais como, os elétrons, núcleos, átomos, moléculas, entre outros, possuem posição e momento (e velocidade) definidos a cada instante, embora não sejam conhecidos simultaneamente, pois os métodos que se pode empregar nas medidas provocam distúrbios nos seus valores, conforme dado pelo princípio da incerteza (PESSOA Jr, 2003).

Admitindo-se que os entes quânticos se encontram em permanente movimento, como no caso de elétrons em um átomo, pode-se apenas afirmar que estes se encontram em uma região em volta do núcleo por força do campo elétrico, porém, com trajetórias incertas. Desse modo, estabelece-se uma nova imagem do átomo, na qual existe uma região do espaço em volta do núcleo onde se podem encontrar os elétrons.

Para uma melhor clareza em relação ao que se está propondo ilustramos a situação proposta na Figura 4.

Figura 4: Nuvem eletrônica do átomo



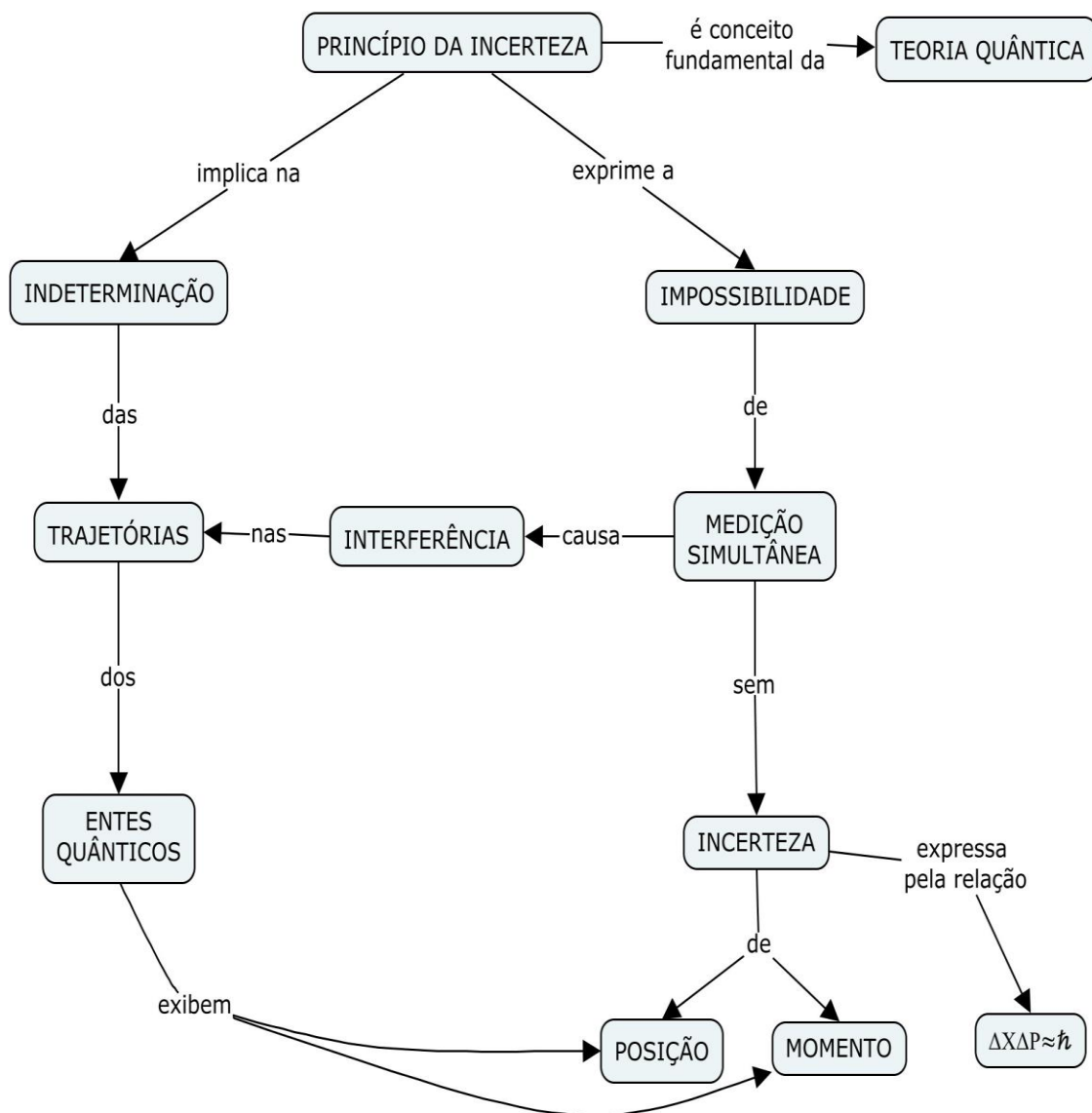
Fonte: <http://www.quimica.seed.pr.gov.br/modules/galeria/detalhe.php?foto=2064&evento=1>

O princípio da incerteza de Heisenberg possibilita a passagem do modelo atômico de Bohr para o modelo atômico de orbitais, contribuindo com a noção de incerteza da trajetória de corpúsculos microscópicos. Ao desejarmos determinar para um ente quântico (elétrons, átomos, moléculas...) a sua trajetória necessitamos saber de forma simultânea a posição e o momento (ou velocidade), contudo a tentativa de realizar as medidas provoca interação com o corpo microscópico gerando incertezas nas medidas. O princípio da incerteza indica por meio da sua relação matemática da incerteza do momento e da posição propiciando deste modo à impossibilidade de se obter a trajetória de entes quânticos.

Os conceitos utilizados na discussão acima caracterizam o sistema conceitual para o princípio da incerteza, que não existe de forma isolada, é constituído por meio da harmonia entre outros conceitos que irão estabelecer vínculos de “dependência e relações entre os objetos representados no conceito e a realidade restante” (VIGOTSKI, 2001).

O sistema conceitual do princípio da incerteza pode ser expresso por um diagrama composto pelos termos: impossibilidade, indeterminação, incerteza, medida e interação com o corpo, simultaneidade, posição, momento, velocidade, trajetória, entes quânticos (elétrons, átomos, moléculas...) e a relação matemática da incerteza de momento e posição. A Figura 5, a seguir, indica tal diagrama.

Figura 5: Diagrama conceitual do Princípio da incerteza



Fonte: o autor (2018)

O sistema conceitual contido no diagrama possibilita visualização dos conceitos a serem abordados durante o processo de ensino e os conceitos que serão utilizados na análise das respostas apresentadas pelos estudantes.

## 4 METODOLOGIA

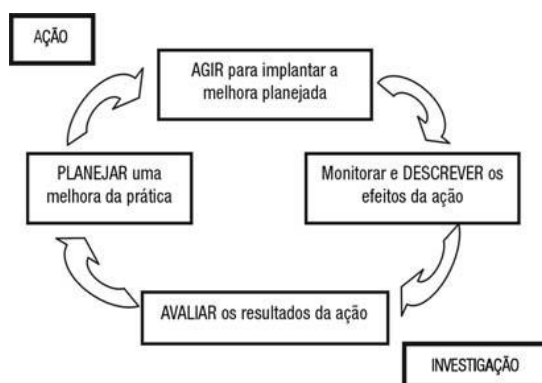
### 4.1 TIPO DE PESQUISA

A pesquisa segue uma perspectiva qualitativa na qual investigamos como estudantes da licenciatura em química se apropriam do princípio da incerteza no contexto do ensino do modelo atômico quântico durante a sua formação. A investigação ocorreu dentro de uma sala de aula com a presença do pesquisador, sendo investigada a apropriação de um conceito por indivíduos de um determinado grupo social, cujos resultados poderão contribuir para o modo como este conceito será ministrado pelo professor.

A Investigação desenvolvida neste trabalho se caracteriza pelo que é exposto por Tripp (2005) como ação pesquisada, por utilizar aspectos da pesquisa-ação de forma parcial.

A pesquisa-ação é conceituada por Tripp (2005) “como uma forma de investigação-ação que utiliza técnicas de pesquisa consagradas para informar à ação que se decide tomar para melhorar a prática”. O processo de investigação-ação segue um conjunto de ciclos de: planejar, implementar, descrever e avaliar uma mudança para a melhora da prática – onde o pesquisador irá aprender mais, no decorrer do processo, tanto a respeito da prática quanto da própria investigação. O ciclo básico da pesquisa-ação pode ser representado pela Figura 6, abaixo:

Figura 6: Representação do ciclo básico da investigação



A pesquisa-ação possibilita ao professor e ao pesquisador criar estratégias que proporcionem, por meio da pesquisa, o aprimoramento do ensino através da prática e por consequência o aprendizado dos alunos. Por mais que a pesquisa-ação apresente características pragmáticas, ela se diferencia da prática e, por mais que seja uma pesquisa, diferencia também da pesquisa científica tradicional por alterar o que está sendo pesquisado e obedecer aos limites do contexto e da ética da prática.

A pesquisa-ação nos leva a pensar sobre os princípios que nos norteiam em nosso trabalho, para que se tenha clareza a respeito, tanto do que estamos fazendo, quanto do por que o estamos fazendo.

Como dito, nossa pesquisa é uma ação pesquisada, pois se resume a um ciclo, apenas. Mesmo que o processo de pesquisa apresente um planejamento para a prática, haja o monitoramento e registros dos efeitos da ação e avaliem-se os resultados obtidos, não há um retorno à sala de aula com os participantes da pesquisa para aplicação do que foi planejado para a melhora da prática após a análise dos resultados. Ainda que o pesquisador aprimore seus conhecimentos sobre a prática e modifique os métodos de ensino para um melhor desenvolvimento do aluno, este só poderá aplicá-los em uma nova turma que não possui o mesmo perfil da turma anterior, logo não teremos como avaliar se as mudanças realizadas na prática serão efetivas, (TRIPP, 2005).



## 4.2 CONTEXTO DA PESQUISA

### 4.2.1 A disciplina

A pesquisa foi desenvolvida na Universidade Federal da Bahia durante as aulas da disciplina Química Quântica I, que faz parte do quadro de disciplinas obrigatórias para o curso de Licenciatura em Química. Os estudantes estão aptos a cursar a disciplina a partir do 4º semestre após terem sido aprovados nas disciplinas: Cálculo B e Química Fundamental III, que são pré-requisitos. O módulo de cada turma é de 45 estudantes.

O componente curricular - Química Quântica I - apresenta a seguinte ementa (DEPARTAMENTO DE FÍSICO-QUÍMICA DA UFBA, 2016):

Fundamentos teórico-experimentais da teoria quântica: quantum de uma grandeza; dualidade onda-partícula; números quânticos; equação de Schrödinger; relações de incerteza; interpretação probabilística da teoria quântica; Átomo de hidrogênio e modelo atômico de orbitais; Átomos multieletrônicos: funções de onda e configurações eletrônicas.

Dentre estes conteúdos o princípio da incerteza apresenta destaque para o desenvolvimento da pesquisa.

A escolha da disciplina Química Quântica I como local de pesquisa ocorreu devido à facilidade de interação com o professor que ministrou suas aulas nos semestres de 2015.2 (piloto) e 2016.1. O desenvolver da pesquisa ocorreu durante o semestre de 2016.1.

### 4.2.2 Turma 2016.1

No semestre de 2016.1 a turma da disciplina era constituída por 37 estudantes matriculados, dos quais apenas 32 participaram da pesquisa, pois 5 estudantes desistiram de continuar no curso. A turma era formada por estudantes de Licenciatura e Bacharelado em Química, dentre os quais, alguns estavam concluindo o curso. Logo, havia estudantes que, além das disciplinas

de pré-requisito possuíam conhecimentos de física que possibilitavam uma melhor compreensão dos temas a serem discutidos em Química Quântica. Os estudantes que participaram da pesquisa, por serem indivíduos na fase adulta, já haviam supostamente realizado a transição entre os estágios de pensamento, indo do complexo para o conceitual, o que viabilizava a aprendizagem dos conteúdos da Química Quântica que só podem ser ensinados por intermédio da abstração.

### **4.2.3 O professor**

O professor da disciplina possui formação em Bacharelado em Química e Doutorado em Química, sendo integrante do Programa de Pós-Graduação em Ensino, Filosofia e História das ciências (PPGEFHC), e no presente trabalho também atua como orientador da pesquisa.

O professor já havia ministrado a disciplina em vários semestres anteriores, desde 2008, de modo que, tinha experiência no ensino da Química Quântica. Por apresentar grande interesse na área de ensino de Química Quântica e nos conceitos da Teoria Histórico-Cultural, o professor tem como objetivo desenvolver suas práticas didáticas e analisar como seu ensino está favorecendo o desenvolvimento conceitual dos estudantes.

### **4.2.4 Planejamento de Ensino**

As aulas sobre os conceitos a serem transmitidos na disciplina foram organizadas por meio do planejamento do professor, o qual consistiu em: aulas expositivas interativas com os estudantes, disponibilização de textos (texto referente ao tema princípio da incerteza – Anexo I) e realização de exercícios e provas.

No início das aulas foi aplicado um questionário de conhecimentos prévios (Anexo C), que será apresentado à frente, o qual englobava perguntas sobre vários pontos da Química Quântica incluindo os conceitos investigados

na pesquisa. Essa foi a primeira fonte de dados coletados durante o semestre. Entendemos que as respostas ao questionário indicam, parcialmente, o estado de desenvolvimento intelectual inicial dos estudantes em relação ao princípio da incerteza.

Entre as aulas ministradas pelo professor no decorrer do curso, as que apresentaram importância para a pesquisa tratavam do tema: **Relações de incerteza e interpretação probabilística da teoria quântica**, que somaram o tempo aproximado de quatro horas, entre exposição e discussão de exercícios. Para esta etapa foram apresentados sete objetivos no Plano de Curso do professor, dos quais três são pertinentes à pesquisa:

- Explicar a impossibilidade de determinação da trajetória de um sistema quântico;
- Explicar como a relação de incerteza entre momento e posição implica na necessidade de modificação do modelo de Bohr-Sommerfeld;
- Calcular a incerteza de medições de posição e momento.

O material didático utilizado para o desenvolvimento das aulas foram os livros: BALL, D. W. **Físico-Química**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2005. v.1. e CRUZ, D.; CHAMIZO, J.; GARRITZ, A. **Estrutura Atômica**: un enfoque químico. Wilmington, USA: Addison-Wesley Iberoamericana, 1991.

Após serem ministradas as aulas introdutórias dos conteúdos, foram aplicados exercícios para o desenvolvimento dos conceitos ensinados e no fim do período foi realizada uma avaliação. Cada instrumento avaliativo (exercícios e provas) forneceu novos dados para a análise do desenvolvimento conceitual dos estudantes.

#### 4.2.5 Instrumentos de Coleta de Dados

A obtenção de dados para a pesquisa foi realizada com a participação voluntária dos estudantes e do professor durante as etapas da investigação e A ocorreu mediante a autorização de todos os participantes por meio do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido, assinado pelo pesquisador e por cada estudante, após apresentação oral da pesquisa (Anexo B).

##### 4.2.5.1 Questionário de conhecimentos prévios

Para avaliar o estado de desenvolvimento inicial dos estudantes em relação à Química Quântica, aplicou-se um questionário de conhecimentos prévios ao ensino ( Anexo C). Os estudantes foram orientados a não deixar nenhuma das questões sem resposta, além de informar se: nunca ouviu falar do assunto; ouviu, mas, não lembra; não entendeu. Dentre as questões, a de número 4 se refere ao princípio da incerteza e esta gerou os primeiros dados para a pesquisa:

**Questão 4.** Se tivesse que explicar para alguém que não conhece o princípio da incerteza de Heisenberg, o que diria?

A questão foi elaborada de modo propositadamente não direcionado, para que o estudante pudesse escrever o que quisesse a respeito do princípio da incerteza. Supomos que os aspectos mencionados seriam aqueles que tivessem ficado mais fortemente armazenados na memória em virtude de aprendizagem anterior.

#### 4.2.5.2 Filmagens e Observações

As aulas ministradas pelo professor foram registradas por meio de gravações em vídeo e em áudio. As gravações tiveram a função de registrar como se desenvolveu o ensino e os momentos de diálogo do professor com os estudantes. A observação das aulas tem o propósito de aproximar o pesquisador da sua fonte de dados e assim poder investigar como ocorreu a aprendizagem e o desenvolvimento dos estudantes. Contudo, as gravações serviram apenas como auxílio para tirar alguma dúvida.

As gravações ocorreram em dois momentos: durante o semestre de 2015.2, na forma de piloto, e no semestre de 2016.1 com a presença de 32 estudantes. A obtenção das imagens e áudios foi autorizado por meio do termo de consentimento livre e esclarecido.

#### 4.2.5.3 Prova e Exercícios

Outras fontes de dados para a pesquisa foram às respostas dos exercícios e das provas realizados na segunda e terceira unidade do curso. Estes materiais foram digitalizados após serem entregue ao professor. Para cada conteúdo abordado eram enviadas listas de exercícios para serem resolvidas pelos estudantes no decorrer do processo e retirar dúvidas sobre o conteúdo ao longo das aulas teóricas ou em aulas de exercícios.

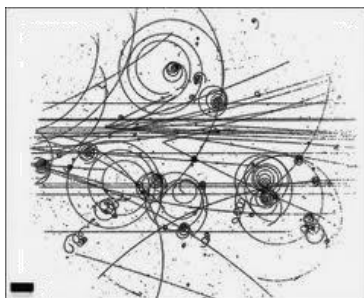
A avaliação de aprendizagem, realizada na forma de prova, era formada por cinco questões, das quais, três eram novas perguntas que seriam resolvidos em sala e duas questões correspondiam a exercícios da lista que deveriam ser resolvidas pelos estudantes em suas casas, para serem entregues na aula posterior.

Dentre as questões presentes na 2ª prova as que contribuíram para a pesquisa foram as de número 3 e 5 que se referem ao princípio da incerteza e sua rede conceitual.

Os quadros apresentados a seguir exibem as questões relativas ao princípio da incerteza, cujas respostas constituem dados da pesquisa, assim como, possíveis respostas apresentadas pelo professor e discutidas em aula.

### Questão 3 da 2ª prova

3. As linhas da figura abaixo correspondem a perturbações provocadas por partículas subatômicas quando atravessam uma câmara de nuvem. Essas linhas são compostas por gotas de água que condensam à medida que as partículas se movimentam pela câmara e, por vezes, são interpretadas como trajetórias da partículas.



- 3.1 Considerando que as gotas d'água têm um diâmetro de  $10^{-5}$  m, calcule a incerteza do valor do momento das partículas, explicando, detalhadamente, cada etapa dos cálculos e os procedimentos realizados.
- 3.2 Considerando: (a) as condições necessárias para o cálculo da trajetória de uma partícula; (b) a relação de incerteza entre posição e momento e (c) que o diâmetro estimado para um átomo é da ordem de  $10^{-10}$  m, explique porque essas linhas não podem ser representações exatas de trajetórias de partículas subatômicas.

#### Possível resposta:

3.1. Quando as partículas atravessam a câmara, provocam a condensação das gotas d'água, que formam as linhas vistas. Entretanto, uma partícula subatômica é muito menor que um átomo ( $10^{-10}$  m) que é cem mil vezes menor que uma gota d'água ( $10^{-5}$  m). Logo a trajetória de uma partícula deve ser muito mais estreita que a largura da linha da figura. Portanto, a largura das linhas corresponde à incerteza na posição de cada partícula ao se mover, ou seja:  $\Delta x = 10^{-5}$  m. Então, considerando que a relação de incerteza entre posição e momento é  $\Delta x \cdot \Delta p \cong h$ , a incerteza do valor do momento será:

$$\Delta p \cong \frac{h}{10^{-5}} = 6,626 \cdot 10^{-34} \cdot 10^5 \frac{\text{J} \cdot \text{s}}{\text{m}} = 6,626 \cdot 10^{-29} \text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

3.2. Para calcularmos a trajetória de uma partícula é preciso conhecer, simultaneamente e com exatidão, uma posição e um momento (ou velocidade) da partícula, a partir dos quais se faz os cálculos das demais posições

constituintes da trajetória. Entretanto, a relação de incerteza entre posição e momento,  $\Delta x \cdot \Delta p \cong h$ , estabelece não ser possível medir ambos, simultaneamente e com exatidão, para uma partícula subatômica, o que impede determinar sua trajetória com exatidão. Por outro lado, as linhas que são vistas na figura têm largura, pelo menos, 1 milhão de vezes maior que o diâmetro uma partícula subatômica (ver 3.1) e, conseqüentemente, que a largura de sua trajetória. Portanto, as linhas da figura não podem ser representações exatas das trajetórias de partículas subatômicas, mas, apenas, indicações de que partículas passaram por aqueles lugares.

**Questão 5 da 2ª prova (Exercício da lista).**

5. Entregar questão 4 da lista de Exercícios 4.

4. Considere os seguintes sistemas:

A. Uma bola com 0,5 kg e movendo-se a 30 m/s;

B. Uma molécula de hidrogênio, com  $3,3 \cdot 10^{-25}$  kg e movendo-se 2000 m/s.

4.1. Explique o processo de medição da posição desses sistemas empregando fótons de radiação gama ( $\nu \cong 10^{20} \text{ s}^{-1}$ ).

4.2. Explique porque a medição da posição não afetará o momento da bola, mas, introduzirá uma incerteza significativa na determinação do momento da molécula.

**Possível resposta:**

4.1. Para medir a posição de um sistema envia-se um feixe radiação gama ( $\nu \cong 10^{20} \text{ s}^{-1}$ ) em sua direção. Os fótons da radiação vão colidir com o sistema e refletir, sendo coletados pelo detector. Durante a colisão, há troca de momento entre o fóton e o sistema. Se o momento do fóton for pequeno em relação ao momento do sistema, a troca de momento não afetará o momento do sistema; do contrário, a medição da posição afetará o valor do momento do sistema.

4.2. Para avaliar se a medição das posições introduzirá, ou não, uma incerteza significativa na determinação dos momentos dos sistemas em foco calcularemos os momentos do fóton e dos sistemas e os compararemos.

a) Para o fóton de radiação gama ( $\nu \cong 10^{20} \text{ s}^{-1}$ ), calculamos o momento,  $p$ , por meio da relação de de Broglie:

$$p = h/\lambda = h \cdot \nu / c = (6,626/3) \cdot 10^{-34} \cdot 10^{20} \cdot 10^{-8} \text{ J.s.s}^{-1} \cdot \text{s.m}^{-1}, \text{ donde}$$

$$p = 2,21 \cdot 10^{-22} \text{ kg.m/s.}$$

b) Para a bola:

$$p = mv = 0,5 \cdot 30 \text{ kg.m/s} = 15 \text{ kg.m/s}$$

c) Para a molécula de H<sub>2</sub>:

$$p = mv = 3,3.2.10^{-25}.10^3 \text{ kg.m/s} = 6,6. 10^{-22} \text{ kg.m/s.}$$

Como se vê, o momento do fóton é pequeno em relação ao momento da bola, de modo que, a troca de momento durante a medição da posição não afetará seu momento.

Por outro lado o momento do fóton é da mesma ordem de grandeza que o momento da molécula. Portanto, poderá afetar seu momento durante a medição da posição.

Na terceira unidade do curso o professor continuou os conteúdos e a utilizar o princípio da incerteza cujo conhecimento também foi avaliado na 3ª prova. Nesta utilizamos como fonte de dados a primeira questão, na qual são necessários os conhecimentos sobre o conceito.

### Questão 1 da 3ª prova

1. Descreva o movimento do elétron de um átomo de hidrogênio no estado fundamental segundo o modelo de orbitais e segundo o modelo atômico de Bohr.

1.1 Explique as diferenças entre as duas descrições, com base no princípio da incerteza e na interpretação probabilística da função de onda.

#### Possível resposta:

1. No modelo atômico de Bohr o elétron se movimenta em órbitas em volta do núcleo, em trajetórias circulares com raio definido: a cada estado corresponde um valor de energia e do raio. O estado fundamental é aquele em que a energia e o raio são menores.

No período entre as proposições dos modelos de Bohr e de orbitais foi proposto o princípio da incerteza, o qual estabelece ser impossível determinar com exatidão e simultaneamente os valores da posição e do momento de um sistema de dimensões dos níveis atômico-molecular e subatômico. Como a determinação de uma trajetória requer o conhecimento exato da posição e do momento do sistema em um instante, verificou-se que as trajetórias propostas no modelo atômico de Bohr não podiam ser determinadas ou calculadas, perdendo seu significado.

No modelo atômico de orbitais o elétron se movimenta em volta do núcleo, em trajetórias não definidas: a cada estado corresponde um valor de energia e uma função de onda,  $\Psi$ . O estado fundamental é aquele em que a energia é menor e a função de onda possui o menor número quântico principal,  $n = 1$ .

Como não se conhece a trajetória do elétron, calcula-se a probabilidade de encontrá-lo em regiões delimitadas do espaço em volta do núcleo com base na



interpretação probabilística da função de onda, por meio da expressão:

$$P = \int_V \Psi^* \Psi dV$$

onde  $\Psi^*$  é o conjugado de  $\Psi$  e  $dV$  é todo o espaço de existência do elétron em volta do núcleo.

Denominamos orbital à região do espaço definida em volta do núcleo onde há probabilidade de encontrar o elétron. Nesse sentido, o orbital substitui a órbita do modelo de Bohr.

As possíveis respostas fornecidas pelo professor buscavam explicitar aos estudantes os elementos necessários para responder à questão.

As repostas foram utilizadas como um caminho para verificar quais conceitos precisariam ser utilizados pelos estudantes na construção das respostas dos problemas propostos, uma vez que não se busca, na investigação, a correção das provas, mas sim, como os estudantes da Licenciatura em Química se apropriam do princípio da incerteza no contexto do ensino do modelo atômico quântico durante a sua formação.

#### 4.3 Metodologia de análise dos Dados

O tratamento dos dados foi realizado utilizando a técnica da análise de conteúdo (BARDIN, 1977), por meio da qual foi identificada a ocorrência dos termos conceituais e conceitos relativos ao princípio da incerteza empregados pelos estudantes para a construção das respostas e, conseqüentemente, na aprendizagem do conceito.

Como exposto no referencial teórico, a discussão do conceito do princípio da incerteza necessita do emprego dos conceitos dos termos: impossibilidade, indeterminação, incerteza, medida e interação do instrumento com o corpo, simultaneidade, posição, momento, velocidade, trajetória, entes quânticos (elétrons, átomos, moléculas...) e a relação matemática da incerteza de momento e posição. Com base nestes termos, criamos 6 categorias a priori: Sentido geral do princípio da incerteza (impossibilidade, indeterminação); Grandezas do movimento às quais a incerteza se aplica (posição, momento,

velocidade); Relação entre incerteza e simultaneidade da medida; Interferência da medida como causa da incerteza dos resultados (interação do instrumento com o corpo); Relação formal entre incerteza das grandezas ( $\Delta p_x \cdot \Delta x \geq \hbar/2$ ); Ente em movimento (partícula, elétron etc.).

Na análise do questionário de conhecimento prévio estes termos foram os critérios para avaliar o estado de desenvolvimento inicial dos estudantes em relação ao princípio da incerteza, oriundos de suas experiências anteriores à disciplina, o qual, será utilizado como um comparativo para observar se houve mudança na formação do conceito pelo estudante ao longo das aulas. Com este paralelo será possível avaliar se o estudante que possuía concepções espontâneas do princípio da incerteza as abandonou e está utilizando as concepções científica em suas respostas. Ou ainda, se não ocorreu mudança, pois este pode ter mantido seus conhecimentos sobre o conceito da mesma maneira, sem alterações significativas.

Para a avaliação das provas e os exercícios também foi utilizada a análise de conteúdo. O referencial teórico e as possíveis respostas das questões fornecidas pelo professor, tiveram a função de indicar se as relações entre os termos estão coerentes para a construção das respostas pelos estudantes.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Estado de desenvolvimento dos estudantes prévio ao ensino

A análise das respostas dos estudantes à questão “Se tivesse que explicar para alguém que não conhece o princípio da incerteza de Heisenberg, o que diria?” foi realizada por meio de 7 (sete) categorias, sendo seis estabelecidas *a priori*, baseadas no sistema conceitual do princípio da incerteza e a sétima categoria, que emergiu da leitura das respostas ao questionário. As categorias, descritas nas próximas seções, são:

Categoria 1: Sentido geral do princípio da incerteza;

Categoria 2: Grandezas do movimento às quais a incerteza se aplica;

Categoria 3: Relação entre incerteza e simultaneidade da medida;

Categoria 4: Interferência da medida como causa da incerteza dos resultados;

Categoria 5: Relação formal entre incerteza das grandezas;

Categoria 6: Ente em movimento;

Categoria 7: Respostas incoerentes.

Cada categoria descrita, será definida nas seções abaixo. Também gostaria de salientar que as respostas dos estudantes apresentaram características, em alguns casos, que as colocaram em mais de uma categoria. Para uma melhor organização do texto será destacada em cada resposta apenas o termo que inclui a resposta na categoria de análise.

### 5.1.1 Sentido geral do princípio da incerteza

O princípio da incerteza afirma a impossibilidade de obter, com precisão e de modo simultâneo, valores para medidas de duas grandezas para entes quânticos. Portanto, foram incluídas nesta categoria as respostas dos estudantes que exprimiram tal impossibilidade, por exemplo: *Impossível dizer com certeza; não tem como ter certeza; não podemos definir com certeza; que não se pode determinar com precisão*<sup>2</sup>. Exemplos de respostas dos estudantes:

**Estudante 1:** *Esse princípio afirma que é impossível dizer com certeza a trajetória ou velocidade de um elétron pelo fato de que a própria medida teria interferência no resultado.*

**Estudante 2:** *Não tem como ter certeza da posição e da velocidade ao mesmo tempo. Se conseguimos com exatidão saber a posição, no caso do elétron, não temos como ter a mesma exatidão para a velocidade.*

Apenas um estudante não se referiu à ideia de impossibilidade.

As expressões utilizadas pelos estudantes são esperadas, por se tratar de indivíduos que cursaram disciplina de química geral que aborda o conceito do princípio da incerteza no conteúdo introdutório à teoria quântica. Parte da bibliografia dessa disciplina (ATKINS; JONES, 2012, p. 15), indica o princípio da incerteza como um princípio de impossibilidade:

A impossibilidade de conhecer a posição com precisão se o momento linear é precisamente conhecido é um aspecto da complementaridade de posição e momento, isto é, se uma propriedade é conhecida, a outra não pode ser. O princípio da incerteza de Heisenberg, [...] expressa quantitativamente esta complementaridade [...]:  $\Delta p \cdot \Delta x \geq \hbar/2$ .

---

<sup>2</sup> As citações diretas de trechos das respostas dos estudantes serão grafadas em itálico para destacar do texto da dissertação.

### 5.1.2 Grandezas do movimento às quais a incerteza se aplica

A construção do conceito do princípio da incerteza passa pelo conhecimento de grandezas, como: velocidade, posição e momento, que possibilitam a determinação das trajetórias de um corpo. Estes conceitos são introduzidos na aprendizagem dos indivíduos durante o ensino de Física na educação básica e no período universitário são desenvolvidos nas disciplinas de Física Geral. Logo, esperamos que os estudantes possuam os conhecimentos básicos de Física uma vez que estes conteúdos são aprendidos em momentos anteriores a Química Quântica I.

Nas respostas, foram observados, majoritariamente, combinações de três termos — posição, momento e velocidade — para formação de dois pares de grandezas: posição e momento ou posição e velocidade. Os termos e conceitos apresentados nas respostas se adequam à categoria, pois pertencem ao mesmo nível conceitual por descreverem o comportamento de um ente em função do tempo e estarem inseridas no conceito do princípio da incerteza. Nota-se que as expressões utilizadas para indicar posição foram de vários tipos: *posição, local, localização, onde se encontra*. Vejamos:

**Estudante 3:** *Diria que este princípio diz que não é possível determinar a posição de uma partícula (elétron) sem saber o seu momento (velocidade) e o contrário também é válido.*

**Estudante 4:** *O princípio da incerteza de Heisenberg diz que não se pode determinar em um mesmo momento a localização e a velocidade de uma partícula.*

Outra resposta apresenta o par: *trajetória e velocidade*, que são conceitos de níveis diferentes, pois torna-se necessário saber a velocidade para se ter a trajetória e a associação destas duas não é expressa pelo conceito do princípio da incerteza.

### 5.1.3 Relação entre incerteza e simultaneidade da medida

A descrição do caminho percorrido por um corpo é realizada a partir do conhecimento de valores precisos e simultâneos de um par de variáveis. Assim, os valores de posição e momento possibilitam descrever a trajetória de um corpo quando obtidos simultaneamente e de forma precisa. Ao realizarmos esta operação para um ente quântico, verificamos a impossibilidade de determinar a trajetória devido às relações de incerteza.

Nesta categoria, 66,9% dos estudantes não apresentaram aspectos que expressassem a simultaneidade da medida nas respostas. Pensamos que aprenderam adequadamente como determinar uma trajetória nas aulas de mecânica e que não ocorreram discussões sobre este aspecto nas aulas de química geral.

Porém, temos que 36,1% dos estudantes apresentaram expressões que apresentam a ideia de simultaneidade: *Mesmo tempo; Em um mesmo momento; Simultaneamente*. Vejamos:

**Estudante 5:** *O princípio da incerteza de Heisenberg informa que não se pode afirmar com certeza a posição e a velocidade de uma onda simultaneamente.*

**Estudante 10:** *Diria que é um princípio no qual não se pode afirmar (determinar) o momento e a posição do elétron ao mesmo tempo. Uma vez que ao aplicar uma certa quantidade de energia para se determinar a posição, já estaríamos o tirando do lugar.*

Pensamos que para estes estudantes a discussão sobre o tema pode ter ocorrido durante as aulas de mecânica clássica ou da disciplina de Física Geral e experimental que aborda conteúdos da teoria quântica, embora esta disciplina de Física seja, costumeiramente, ofertada a partir do 6º semestre para os estudantes da graduação em química, ou seja, 2 semestres após a disciplina de Química Quântica, que pode ser cursada a partir do 4º semestre. Contudo, existe a cultura entre os estudantes de química em adiar para o final do curso a participação em Química Quântica, após as disciplinas de Física.

Desta forma, podem ter abordado o tema antes de cursar Química Quântica e assim possuir conhecimentos a respeito do tema.

#### 5.1.4 Interferência da medida como causa da incerteza dos resultados

A obtenção dos valores de grandezas como: velocidade, posição e momento, que possibilitam a determinação de trajetória de um corpo, necessitam da execução de medidas. O processo de medição requer detectar o corpo e, para tal, devemos lançar fótons que possibilitam obter as medidas. Contudo, ao realizarmos este procedimento para um ente microscópico, mesmo com um instrumento de medida de alto poder de resolução, provocamos interferências no seu movimento. Nesta categoria buscamos aspectos que abordem a ideia de incertezas nas medidas das variáveis dinâmicas provocadas pelo processo de medição.

Em 86,1% das respostas não foram encontrados aspectos que expressassem a categoria, o que nos leva a pensar que estes estudantes não tiveram contato com o conceito abordado em outras disciplinas da graduação. Outros 13,9% dos estudantes apresentaram alguma resposta pertinente ao conceito, aos quais julgamos ter discutido este aspecto na disciplina Física Geral e Experimental. Entre as respostas positivas encontramos as expressões: *Medida teria interferência no resultado...; Uma vez que ao aplicar uma certa quantidade de energia para se determinar a posição, já estaríamos o tirando do lugar.* Duas das respostas:

**Estudante 6:** *O princípio da incerteza de Heisenberg consiste na ideia de que não é possível determinar precisamente a posição e a velocidade do elétron simultaneamente e isto deve-se ao fato de que ao utilizar uma forma de determinar precisamente a posição do elétron, este instrumento insere uma imprecisão na determinação da velocidade e vice-versa.*

**Estudante 11:** *O princípio da incerteza de Heisenberg diz que é possível medir a posição da partícula mas, ao fazer essa medição a interação irá interferir na velocidade e vice-versa.*

Tais expressões se aproximam da caracterização da ideia de interferência da medida que esperávamos encontrar nas respostas dos participantes.

### 5.1.5 Relação formal entre incerteza das grandezas

A expressão matemática da relação de incerteza entre momento e posição é dada por:

$$\Delta p_x \Delta x \geq \hbar/2$$

Como se pode notar, as incertezas da posição e do momento são inversamente proporcionais. Logo, ao se determinar a posição com precisão, ou seja, quando a incerteza da posição tender a zero, teremos uma imprecisão no valor do momento que tenderá ao infinito e vice-versa.

A análise buscou expressões que apresentassem a relação existente entre posição e momento correlacionando com a precisão na determinação destas grandezas e a associação com o expresso pelo princípio da incerteza.

A avaliação das respostas constatou que nenhum dos estudantes utilizou a expressão matemática do princípio da incerteza em suas respostas para relacionar posição e momento. Apenas 8% dos estudantes apresentaram respostas qualitativamente pertinentes à categoria por meio de textos. Por exemplo:

**Estudante 2:** Se conseguirmos com exatidão saber a posição, no caso do elétron, não temos como ter a mesma exatidão para a velocidade.

**Estudante 6:** O princípio da incerteza de Heisenberg consiste na ideia de que não é possível determinar precisamente a posição e a velocidade do elétron simultaneamente e isto deve-se ao fato de que ao utilizar uma forma de determinar precisamente a posição do elétron, este instrumento insere uma imprecisão na determinação da velocidade e vice-versa.

Como ocorreu em categorias anteriores, avaliamos que estes estudantes discutiram os aspectos referentes a esta categoria na disciplina Física Geral e



Experimental. Os demais 92% não apresentam nenhum conceito que expresse a categoria. Estes estudantes possivelmente não tiveram contato com os aspectos tratados na categoria em disciplinas anteriores, logo devem ser estudantes regulares no curso, ou seja, não cursaram as disciplinas de Física.

### 5.1.6 Ente em movimento

Nesta categoria foram enquadradas as repostas que apresentaram algum ente quântico (elétron, átomo, molécula etc.) ao qual a ideia do princípio da incerteza de Heisenberg se aplica. Nas respostas encontramos os termos: *elétron, partícula, onda, certo corpo*; entre estes, o termo elétron apresentou maior frequência com 55,56% das respostas e, em segundo lugar, o termo partícula, com 16,27%. Exemplos de respostas:

**Estudante 13:** *Um princípio no qual diz que não há como saber a velocidade e as coordenadas (localização) do elétron simultaneamente.*

**Estudante 15:** *Princípio do qual não se pode ter 100% de certeza do momento e do local de uma partícula subatômica.*

Observa-se que estes termos são mais utilizados pelos estudantes para a caracterização de um ente quântico devido a terem sido estudados na disciplina Química Fundamental, que trata do modelo atômico quântico de forma qualitativa. Neste componente curricular os estudantes têm como indicação bibliográfica o livro *Princípios de Química* de Atkins e Jones (2012) que utiliza os termos elétron e partícula quando discutem sobre o princípio da incerteza na teoria quântica.

Dois outros termos — *onda* e *certo corpo* — compareceram com cerca de 5,56%, são citados pelos estudantes, porém não se adequam à categoria e 22,23% das respostas não apresentaram um termo que simbolizasse o ente quântico. Esta situação ocorre como descrito em outras categorias devido aos estudantes não terem estudado o conceito em disciplinas anteriores, ou ainda não conseguem associar o princípio da incerteza ao movimento dos entes

quânticos e a consequência que esta associação gera na determinação da trajetória.

### 5.1.7 Respostas Incoerentes

A categoria inclui respostas que não são coerentes com o conceito abordado no questionário. Três estudantes apresentaram respostas que não apresentaram contribuições para construção do conceito, por destacar outro aspecto da teoria quântica, por exemplo:

**Estudante 7:** *O princípio da incerteza descreve o comportamento do elétron diante do método usado para estudá-lo e seu estudo implica em discernir o elétron e seu comportamento como onda ou partícula, ao partir do pressuposto de que o elétron age como onda não é possível estudá-lo como partícula e vice-versa.*

**Estudante 36:** *O princípio da incerteza de Heisenberg, pode ser explicado através de um simples experimento, que consiste em bombardear uma fenda que dista de um anteparo a uma certa distância  $d$ . Os elétrons que atravessarem a fenda irão se chocar no anteparo em diversos lugares da superfície deste, sendo que em alguns lugares a probabilidade de encontrar o elétron é maior do que em outras. Porém a presença desse elétron não pode ser observada.*

Pensamos que estes estudantes podem ter confundido os conceitos da teoria quântica aprendidos em disciplinas anteriores e assim têm dificuldades para aplicá-los de forma correta.

Outros cinco estudantes apresentaram as seguintes respostas: *Já ouvi falar mas não me lembro; Não lembro; Ovi mas não lembro; Sei mas não lembro; Esse princípio só conheço de ouvi falar.* Por meio desta resposta não podemos concluir se o estudante realmente teve contato com o conceito.

A partir da análise das respostas dos estudantes ao questionário de conhecimentos prévios ao ensino, constatamos que a maioria dos participantes

da pesquisa apresenta concepções acerca do sistema conceitual do princípio da incerteza conforme exposto nas cinco primeiras categorias de análise apresentadas.

Visando representar mais claramente o nível de desenvolvimento psicolinguístico dos estudantes, construímos um quadro (Quadro A1, Apêndice A) indicativo dos elementos do sistema conceitual do princípio da incerteza explicitados por cada estudante, indicando se os termos empregados são científicos (indicados com a letra **c**) — ou seja: expressões predominantemente utilizadas pela comunidade científica — ou expressões sinônimas (indicadas com a letra **s**). Desse modo, podemos visualizar a abrangência do pensamento de cada estudante e seu domínio linguístico do conteúdo.

O Quadro A1 pode ser resumido no Quadro I, abaixo:

**Quadro I:** Conceitos empregados pelos estudantes em cada categoria

Conceito	Quant. de respostas	Frequência de emprego	Termo científico	Termo sinônimo
<b>Categoria 1 (impossibilidade)</b>	28	77,8%	0,0%	77,8%
<b>Categoria 2 (Posição, momento ou velocidade)</b>	30	83,3%	75,0%	22,2%
<b>Categoria 3 (simultaneidade)</b>	13	36,1%	11,1%	25,0%
<b>Categoria 4 (interação dos corpos)</b>	6	16,6%	0,0%	16,7%
<b>Categoria 5 (exatidão)</b>	3	8,3%	2,8%	5,6%
<b>Categoria 6 (partícula subatômica)</b>	29	80,5%	16,7%	63,9%
<b>Categoria 7 (respostas inadequadas)</b>	5	13,8%	0,0%	0,0%

O Quadro I nos mostra que, ao se questionar os estudantes sobre o princípio da incerteza, a maioria apresenta em suas respostas os conceitos de impossibilidade, posição, momento ou velocidade e partícula subatômica. Estes conceitos são de fundamental importância para a construção conceitual do princípio da incerteza e acreditamos que tenham sido apresentados aos estudantes durante as disciplinas de Física Experimental e Química Fundamental. Logo, observa-se que os participantes da pesquisa apresentavam conhecimentos básicos sobre o conceito a ser ensinado (e pesquisado). Os outros conceitos foram pouco lembrados pelos estudantes como pode ser observado no Quadro I. A dificuldade de expressar tais conceitos deve ser reflexo da sua baixa utilização nas disciplinas anteriores, de modo que, torna-se necessário intensificar sua discussão durante o ensino na disciplina Química Quântica I.

Os estudantes demonstraram, ao menos parcialmente, conceitos de modo científico, pois souberam enunciá-los, embora a questão não solicitasse justificativas. Além disso, as respostas exibem conhecimentos sobre o princípio da incerteza que se equiparam parcialmente ao previsto para as aulas do professor, como podemos verificar pelo material didático fornecido aos estudantes (Anexo A). Os conhecimentos prévios que cada estudante possuía atuaram como facilitadores da aprendizagem, pois a compreensão dos conteúdos poderia ser aprofundada, uma vez que existe familiaridade com os conceitos que serão expressos pelo professor.

Salienta-se que o conceito do princípio da incerteza contém uma vertente espontânea centrada no termo **incerteza**, cujo significado é diferente do conceito discutido em sala de aula. A espontaneidade ligada ao termo incerteza pode ser descrito por: falta de certeza ou dúvida — contudo, estes significados não se confundem com a ideia de impossibilidade. Portanto, não era esperado que este significado de cunho espontâneo apresentasse interferência no ensino do conceito científico.

O Quadro I (e o Quadro A1) também mostra que os termos empregados pelos estudantes são em sua maioria expressões sinônimas. Poucos são os estudantes que utilizam termos científicos nas respostas.

Estes primeiros resultados revelaram que os estudantes apresentavam desenvolvimento conceitual esperado para o nível de formação no qual estão inseridos.

Para investigar como os estudantes da Licenciatura em Química se apropriaram do princípio da incerteza no contexto do ensino do modelo atômico quântico durante a sua formação na disciplina Química Quântica I, passaremos a analisar a segunda fonte de dados: as questões das provas da segunda unidade e da terceira unidade que foram apresentadas na metodologia. Esta etapa de análise será conduzida de modo similar à do conhecimento prévio, sendo realizado um paralelo entre as respostas dos estudantes apresentadas no estado de desenvolvimento inicial e as novas concepções vindas das provas com intuito de verificar se houve mudanças nos termos utilizados e nos significados relativos ao princípio da incerteza.

## 5.2 Análise das provas

A prova da segunda unidade apresenta 5 questões das quais a 3ª e a 5ª tratam do princípio da incerteza, como mostrado na Metodologia. Para a 3ª questão, o referencial teórico e as possíveis respostas apresentadas pelo professor indicaram os conceitos necessários para a construção das respostas dos itens 3.1 e 3.2: partículas subatômicas, trajetória, incerteza, posição, momento ou velocidade, relação de incerteza:  $\Delta x \cdot \Delta p \cong h$ , simultaneidade, exatidão. Como feito anteriormente será indicado se os termos empregados pelos estudantes são de cunho científico ou expressões sinônimas, para assim visualizar extensão do pensamento e o domínio linguístico do conteúdo em cada estudante.

Por meio de leituras das respostas dos estudantes foi possível elaborar o Quadro B1 (Apêndice B), que expressa os significados empregados por cada estudante na conceituação de suas respostas. A inspeção do Quadro B1 revela que 10 estudantes (31,3%) utilizaram todos os conceitos indicados como necessários na composição das respostas dos itens 3.1 e 3.2. Também mostra que alguns dos estudantes ainda utilizaram, em suas respostas, sinônimos ou expressões que denotam sinonímia para referir-se a certos conceitos que indicados na rede conceitual. Vejamos exemplos de respostas:

**Simultaneidade da medida:**

**Estudante 13** – *Para saber sua trajetória é preciso saber sua posição e velocidade naquele instante;*

**Estudante 16** – *Ao ter a certeza da posição não se pode ter do momento e vice-versa.*

**Partícula subatômica:**

**Estudante 8, 12 e 13** - *Sistema microscópio;*

**Estudante 14** – *Corpo com comportamento de onda;*

**Estudante 15 e 26** – *Elétrons.*

**Exatidão:**

**Estudante 7, 12, 21, 28** – *Precisão.*

**Estudante 17** – *Não podemos determinar exatamente;*

**Trajectoria:**

**Estudante 22** – *Não há sentido em falar sobre órbitas, pois não se consegue determina-las.*

Note-se (Quadro B1) que a quantidade de estudantes que não empregaram os termos científicos é muito menor que no início do curso, indicando que houve aprendizagem e desenvolvimento em relação à terminologia do princípio da incerteza.

Contudo, o emprego de sinônimos pelos estudantes revela que — embora possamos inferir que estes tivessem o conhecimento do conceito, uma vez que suas respostas faziam sentido — no momento de expressá-lo ainda não apresentaram o termo comumente utilizado na comunidade científica, talvez por não dispor da lembrança desta palavra no momento da prova, que sempre é uma situação de tensão. Este fato nos leva a recomendar a intensificação do emprego dos conceitos científicos durante o ensino e dos termos científicos correspondentes.

A partir do Quadro B1 foi determinada a percentagem de emprego dos conceitos pelos estudantes, originando o Quadro II abaixo, que apresenta a frequência de emprego dos conceitos pelos estudantes em suas respostas.

**Quadro II:** Conceitos empregados pelos estudantes nas respostas da questão 3.

Conceito	Quant. de respostas	Frequência de emprego	Termo científico	Termo sinônimo
Partícula subatômica	29	90,6%	68,8%	25%
Trajectoria	29	90,6%	90,6%	0,0%
Incerteza	29	90,6%	90,6%	0,0%
Posição	30	93,8%	93,8%	0,0%
Momento ou velocidade	31	96,9%	96,9%	0,0%
Relação de incerteza - $\Delta x \cdot \Delta p \cong h$	28	87,5%	87,5%	0,0%
Simultaneidade da medida	16	50,0%	37,5%	18,8%
Exatidão	24	75,0%	59,4%	12,5%

Ao compararmos o quadro II com o quadro I podemos observar a mudança no uso dos termos científicos e expressões sinônimas pelos estudantes. Como visto, existe um constante emprego de sinônimos nas respostas do questionário de conhecimentos prévios e após as aulas com as discussões realizadas pelo professor nota-se a crescente utilização de termos científicos.

O Quadro II mostra que a maior dificuldade dos estudantes esteve em explicitar a necessidade de que os valores de posição e momento ou velocidade que definem uma trajetória devem ser simultâneos.

O exame do texto distribuído aos estudantes pelo professor (Anexo A) mostra que o termo **simultaneidade** não é citado na discussão acerca do princípio da incerteza, aparecendo, apenas na citação de Max Born. Desse modo, a bibliografia indicada pelo professor não contribuiu para a aprendizagem dos estudantes.

Por meio dos vídeos das aulas sobre o princípio da incerteza observou-se que o professor inicia o conteúdo proposto com a introdução do conceito de

função de onda e logo após a discussão deste introduz o conceito do princípio da incerteza de Heisenberg. Contudo não foi detectado o uso do termo simultaneidade pelo professor durante as discussões sobre o conceito e os vídeos sobre as aulas de exercícios também não constam o uso do termo. Logo, como o termo não foi explicitado durante as aulas é comum que os estudantes não o utilizem em suas respostas.

Embora tenha havido um aumento na frequência de emprego da simultaneidade da medida na prova em relação ao estado de desenvolvimento inicial (36,1%), uma vez que metade dos estudantes não empregou o conceito, podemos concluir pela necessidade de, em futuras turmas, o professor enfatizar a simultaneidade da medida para que os estudantes se apropriem do termo, além do significado.

Outra dificuldade observada (25%) foi no conceito de exatidão dos valores de posição e momento necessários para descrever uma trajetória. Note-se também a dificuldade em vincular a relação de incerteza e com o conceito de trajetória (12,5%, cada). Entendemos que tais dificuldades indicam falta de clareza acerca do princípio da incerteza, de modo geral, apontando para a necessidade de melhorar a articulação entre tais aspectos no ensino. Contudo, houve grande diferença entre o estado de desenvolvimento inicial e posterior à prova, que pode ser atribuída à influência do ensino.

Para o conceito de exatidão, a análise dos vídeos das aulas revelou que o professor utiliza o termo tanto nas aulas teóricas quanto nas aulas de exercício para a discussão sobre as medidas de momento e posição.

A leitura das respostas despertou atenção em relação ao item 3.1 da questão, o qual necessitava do desenvolvimento de cálculo da relação de incerteza,  $\Delta x \cdot \Delta p \cong h$  para elaboração da resposta. Neste item observou-se que apenas alguns estudantes (12,5%) empregaram a equação adequadamente, porém, a maioria não percebeu como utilizá-la na resposta, conforme descrito no Quadro III



**Quadro III:** Emprego da relação de incerteza nas respostas.

<b>OBSERVAÇÃO</b>	<b>ESTUDANTES (exemplos)</b>
Cálculo desenvolvido como apresentado nas possíveis respostas.	19, 21, 28 e 30
Citaram a equação, mas não desenvolveram o cálculo no item.	5, 7, 16, 24, 26, 29
Não citaram a equação para desenvolver a resposta.	12, 15 e 18
Não fez a questão 3	27

O Quadro III mostra a dificuldade encontrada pela maioria dos estudantes em desenvolver o cálculo da relação de incerteza na elaboração das respostas, e para o estudante 27 que não respondeu à questão.

Para um melhor resultado em futuras turmas da disciplina indica-se a aplicação de exercícios que empreguem a expressão do princípio da incerteza durante o ensino.

Ao observarmos os indicadores do estado de desenvolvimento inicial contidos no Quadro A1 (Apêndice A), em paralelo com os resultados encontrados na análise da 3ª questão que são expressos no Quadro B1 (Apêndice B), constata-se que os estudantes apresentaram mudança no emprego dos conceitos pertencentes ao sistema do princípio da incerteza, mostrando uma evolução dos termos conceituais ocorrida durante as aulas ministradas pelo professor sobre o conceito. As aulas propiciaram aos estudantes a incorporação de termos científicos que ocuparam o lugar das expressões sinônimas e a inserção de novos conceitos que não constavam nas suas respostas anteriores.

Neste ponto, verifica-se que os estudantes aprenderam o conteúdo de forma sistemática, o que lhes propicia a aplicar de forma voluntária os conceitos aprendidos e poder transpor estes conhecimentos para outras situações que lhes sejam apresentadas. Este fato caracteriza o nível de pensamento conceitual de modo científico.

Contudo, segundo a avaliação do professor, parte das respostas dos estudantes não estava coerente. Isto mostra que, apesar dos estudantes

empregarem os conceitos relativos ao princípio da incerteza nas respostas, seu emprego não foi completamente satisfatório. Sendo assim, podemos inferir que os estudantes souberam enunciar os conceitos, mas, não justificaram adequadamente seu emprego, já que a correção da resposta é que justificaria seu emprego.

Este fato nos remete a pensar que os estudantes estão inseridos no nível de desenvolvimento do pensamento conceitual mas necessitam desenvolver o domínio linguístico do conteúdo, para apresentar em seus textos conexões mais adequadas para os conceitos.

Por mais que a análise das dificuldades verificadas na avaliação do professor fuja ao escopo desta dissertação, sugerimos que para resolver tais problemas o ensino dos conceitos seja desenvolvido com a aplicação de exercícios em sala de aula que viabilizem a discursão sobre como as respostas devem ser construídas e a relação que deve ser estabelecida pelos conceitos para que estes apresentem coerência na redação.

Para nos aprofundarmos no desenvolvimento conceitual dos estudantes analisamos a 5ª questão da prova que é referente a uma lista de exercícios disponibilizada pelo professor. Este exercício, como visto na Metodologia, seria o de número 4. Foram destacados os seguintes termos para a análise das respostas, segundo as possíveis respostas fornecidas pelo professor e os conceitos abordados no referencial teórico desta pesquisa: troca de momento, incerteza no momento, cálculo do momento ( $p=m.v$  ou  $p=h/\lambda$ ), posição. A leitura das respostas revelou que alguns dos estudantes também utilizavam os termos: relação de incerteza e trajetória, para conceituação das respostas. Como feito nas análises anteriores, foram buscados os conceitos científicos e as expressões sinônimas para cada termo exposto acima. A partir da leitura foi construído o Quadro C1 (Apêndice C), que possibilitou a confecção do Quadro IV onde é possível visualizar as frequências de emprego dos conceitos pelos estudantes:

**Quadro IV:** Conceitos empregados pelos estudantes nas respostas da 5ª questão.

Conceito	Quant. de respostas	Frequência de emprego	Termo científico	Termo sinônimo
Troca de momento	29	90,6%	62,5%	28,1%
Incerteza no momento	31	96,8%	81,3%	16,6%
Cálculo do momento	30	93,6%	90,6%	3,1%
Posição	30	93,8%	93,8	0,0%
Relação de incerteza - $\Delta x \cdot \Delta p \cong h$	4	12,5%	12,5%	0,0%
Trajectoria	4	12,5%	12,5%	0,0%
Princípio da incerteza	5	15,6%	15,6%	0,0%

O Quadro IV revela que a maioria dos estudantes utilizou os conceitos de troca de momento, incerteza no momento, cálculo do momento e posição na terminologia científica para a construção das respostas. Apenas alguns dos estudantes utilizaram expressões sinônimas ou não apresentaram algum termo ou, ainda, como no caso do estudante 22, não respondeu à questão.

Observou-se que alguns dos estudantes (12,5%) aplicaram os conceitos de relação de incerteza -  $\Delta x \cdot \Delta p \cong h$ , trajetória e princípio da incerteza na construção de suas respostas. O uso destes termos contribuiu para a construção dos textos destes estudantes, por mais que a questão em si não necessitasse da aplicação destes conceitos, logo os demais estudantes que não fizeram uso dos conceitos citados não apresentaram prejuízo nas respostas.

A 5ª questão vem ratificar o que foi observado na 3ª questão: que os estudantes ampliaram seu nível de desenvolvimento de pensamento conceitual após as aulas sobre o conteúdo referente ao princípio da incerteza e, desta forma, utilizam conceitos científicos para a construção da resposta.

Buscando ampliar os resultados da pesquisa, foram analisadas as respostas da 1ª questão da prova da 3ª unidade, que está exposta na Metodologia. Na construção dos argumentos para responder à questão os estudantes deveriam apresentar os seguintes conceitos, segundo as possíveis respostas apresentadas pelo professor da disciplina: princípio da incerteza, impossibilidade, exatidão, simultaneidade, posição e momento, sistemas atômico-molecular e subatômico e trajetória. Como ocorrido para as questões anteriores a análise considerou se os termos indicados pelos estudantes eram científicos ou expressões sinônimas. A partir da leitura das repostas foi elaborado o Quadro D1 (apêndice D) que possibilitou avaliar a porcentagem de emprego dos conceitos pelos estudantes e a construção do Quadro V:

**Quadro V:** Conceitos empregados pelos estudantes nas respostas da 1ª questão - 3ª prova

Conceito	Quant. de respostas	Frequência de emprego	Termo científico	Termo sinônimo
Princípio da Incerteza	29	96,6%	90,0%	6,7%
Impossibilidade	22	73,3%	23,3%	50,0%
Exatidão	22	73,3%	40,0%	33,3%
Simultaneidade	21	70,0%	50,0%	20,0%
Posição e Momento	28	93,3%	90,0%	3,3%
Sist. Atômico-Molecular / subatômico	29	96,6%	93,3%	3,3%
Trajétória	26	86,6%	73,3%	13,3%

Embora o ensino dos conceitos que formam a rede conceitual do princípio da incerteza tenha ocorrido durante a 2ª unidade da disciplina, ao observar o Quadro V, relativo à 3ª unidade do curso, nota-se que a maioria dos estudantes utilizou os conceitos necessários para a construção da resposta, o que indica retenção da aprendizagem. Apenas o estudante 24 não respondeu ao item.

O Quadro D1 (Apêndice D) também revela que poucos estudantes utilizaram expressões sinônimas em suas respostas o que caracteriza um avanço no nível de desenvolvimento do pensamento conceitual. Contudo como relatado pelo professor da disciplina parte das respostas não estava coerente, indicação de que, apesar do domínio da terminologia, faltou domínio das relações conceituais importantes para o raciocínio necessário à resposta da questão.

## **6- CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Entendemos que o objetivo da nossa dissertação — investigar como estudantes da licenciatura em química se apropriam do princípio da incerteza no contexto do ensino do modelo atômico quântico durante a sua formação — foi atingido. A pesquisa revelou que os conhecimentos prévios dos estudantes sobre o princípio da incerteza eram, em boa parte, constituídos por um conjunto de conceitos corretos, embora dominado por expressões não científica, tomadas como sinônimas dos termos científicos. Este primeiro resultado demonstrou que os estudantes possuíam desenvolvimento conceitual adequado para o nível de formação em que se encontravam.

A comparação do Quadro I (Quadro A1) com o Quadro II (Quadro B1) e o Quadro III (Quadro C1) demonstra a transformação ocorrida na terminologia dos estudantes durante o período de aulas, os quais avançaram no sentido de substituir a utilização das expressões sinônimas iniciais por termos científicos nas suas respostas aos problemas propostos.

Pelo que foi visto na análise dos resultados, cada estudante participante da pesquisa apresentou um progresso favorável em sua compreensão do conceito do princípio da incerteza, desde o questionário de conhecimentos prévios até a terceira prova no final do semestre, o que nos levou a constatar que a apropriação ocorre de forma gradativa no decorrer do curso de Licenciatura em Química.

Devemos salientar que o processo de apropriação do conceito não ocorre apenas na disciplina Química Quântica I, mais também durante as disciplinas de Física Geral e Experimental e Química Fundamental, que são cursadas

anteriormente à disciplina onde ocorre a pesquisa. Logo, a intensificação do processo ocorre durante as aulas da disciplina Química Quântica I.

Os resultados obtidos na pesquisa apontam que os estudantes da disciplina estão aptos a responder questionamentos a cerca do conceito, pois foi constatado um crescimento no estado de desenvolvimento do pensamento conceitual destes estudantes após as aulas sobre o conteúdo e em situações posteriores às quais estes são questionados sobre o assunto. Sabemos que normalmente após o fim de um período e a introdução de novos conteúdos os estudantes tendem a esquecer dos conteúdos discutidos anteriormente, logo não esperamos que após um mês de aula sobre novos conteúdos, as discussões antigas sejam lembradas. Mas o que foi visto na análise da terceira prova sugere alguma retenção, já que como observamos mesmo depois de certo tempo ao serem questionados sobre o princípio da incerteza os estudantes demonstraram em suas respostas os conceitos necessários para a elaboração do sistema conceitual requerido na discussão da questão.

Por mais que um número satisfatório de estudantes tenha demonstrado um crescimento intelectual com o método de ensino aplicados pelo professor da disciplina, observamos que alguns pontos devem ser melhorados para futuras turmas para que desta forma o processo de ensino promova a cada dia o desenvolvimento dos estudantes. Propomos os seguintes aprimoramentos nas aulas:

1. Recomendamos que sejam realizadas discussões sobre os conceitos a serem abordados na disciplina para que cada estudante venha a ativar as suas memórias sobre os conteúdos estudados anteriormente e os aprimore no decorrer do processo;

2. Sugerimos que o material didático fornecido pelo professor seja revisado para constatar se nenhum dos conceitos ou aspectos conceituais a serem discutidos deixou de ser trabalhado e assim venha a contribuir de forma mais efetiva para a aprendizagem;

3. Para intensificar o desenvolvimento dos cálculos necessários ao aprendizado, sugerimos a execução de mais exercícios que utilizem a expressão do princípio da incerteza durante o ensino, para que deste modo à equação fique mais clara e seja vista como parte do arcabouço teórico;

4. Para propiciar a melhoria do texto escrito dos estudantes sugerimos que sejam apresentadas pelo professor as possíveis respostas de exercícios durante as aulas para que os estudantes visualizem a forma de escrita das respostas e a coerência entre as expressões.

Devido às limitações, possíveis ações para a continuidade da pesquisa devem ser desenvolvidas posteriormente em novas investigações acadêmicas. Para a continuidade da pesquisa propomos:

- I. A análise textual para verificar a articulação dos conceitos por meio dos nexos que possibilitam as relações entre as frases;
- II. Elaboração de material didático voltado para o ensino do princípio da incerteza para estudantes do ensino médio e do ensino superior.
- III. A investigação de outros aspectos do modelo atômico quântico como a equação de Schroedinger que descreve os estados quânticos para átomo.

Estes aspectos podem ser abordados futuramente para aprofundar as pesquisas no âmbito da teoria quântica para químicos, além de propiciar novas técnicas para o desenvolvimento dos métodos de aprendizagem na área Educação em Química.

## 7- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ATKINS, P.; JONES, L. **Princípios de química**: questionando a vida moderna e o meio ambiente. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

BARDIN, Laurence. **Análise de conteúdo**. 3. ed. Lisboa: Edições 70, 1977.

BELLAS, R. R. D.; GONZALES, I. M; SILVA, J. L. P. Mapas conceituais em perspectiva histórico-cultural. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, 10., 2015, Águas de Lindóia, SP. **Atas...** Rio de Janeiro: ABRAPEC, [2015?]

BRASIL. Ministério da Educação. Secretária da Educação Básica. **Orientações curriculares para o Ensino Médio. Ciências da natureza, matemática e suas tecnologias**. v. 2. Brasília: MEC/SEB, 2006.

DEPARTAMENTO DE FÍSICO-QUÍMICA DA UFBA. **Programa de QUIA49 - Química Quântica I**, 2016. Não publicado.

EFEITO FOTOELÉTRICO E COMPTON. **Efeito Compton** – imagem. São Paulo, 2011. Disponível em: <<http://efeitofotoeletricoecompton.webnode.com.br/efeito-compton/>>. Acesso em 28/03/2013.

EINSTEIN, A. Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da produção e da transformação da luz. In: STACHEL, J. (Org.) **O Ano Miraculoso de Einstein**: cinco artigos que mudaram a face da Física. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 2005. p. 201-222

EISBERG, Robert; RESNICK, Robert. **Física Quântica**. Rio de Janeiro: Elsevier, 1979.

GAMOW, G. **Thirty Years that Shook Physics**: the story of Quantum Theory. New York: Dover, 1985.

GUPTA, N. N. DAS; GHOSH, S. G. A report on the Wilson cloud chamber and its applications in physics. **Reviews of Modern Physics**, v. 18, n. 2, p. 225-290, 1946.

HEISENBERG, W. **A parte e o todo**: encontros e conversas sobre física, filosofia, religião e política. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996.

HEISENBERG, W. **The physical principles of the quantum theory**. Mineola: Dover, 1949.

HEISENBERG, W. **The development of quantum mechanics** (Nobel Lecture). Stockholm: Royal Swedish Academy of Sciences, 1933.

HEISENBERG, W. **The physical content of quantum kinematics and mechanics**. In: WHEELER, John Archibald; ZUREK, Wojciech Hubert. Quantum theory and measurement. Princeton: Princeton University Press, 1983. p.62-84.

TRIPP, D. Pesquisa-ação: uma introdução metodológica. **Educação e Pesquisa**, v. 31, n. 3, p. 443-466, 2005.

MOURA, C. B.; GUERRA, A. Modelos atômicos em livros didáticos de química do PNLEM 2012: uma análise qualitativa à luz da história e filosofia da ciência. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, 9., 2013, Águas de Lindóia, SP. **Atas...** Rio de Janeiro: ABRAPEC, 2013.

PORTAL EDUCACIONAL DO ESTADO DO PARANÁ. **Portal dia a dia educação**. Galeria de imagens – elementos químicos. Paraná, 2004. Disponível em: <<http://www.quimica.seed.pr.gov.br/modules/galeria/detalhe.php?foto=2064&evento=1>> Acesso em: 28/03/2013.

PESSOA JR., O. **Conceitos de Física Quântica**. São Paulo: Livraria da Física, 2003.



PESSOA JR., Osvaldo. Introdução históricas à teoria quântica, aos seus problemas de fundamento e às suas interpretações. **Cadernos de Física da UEFS**, v. 4, n. 1 e 2, p. 89-114, 2006.

RAMIREZ, J. E. M.; BADILLO, R. G.; MIRANDA, R. P. El modelo semicuántico de Bohr en los libros de texto. **Ciência & Educação**, v. 16, n. 3, p. 611-629, 2010.

SANTOS, E. S. **Modelo atômico (didático) de Bohr-Heisenberg**. 2013. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Licenciatura em Química) - Instituto de Química, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2013. Não publicado.

SANTOS, E. S.; SILVA, J. L. P. B. Modelo atômico (didático) de Bohr-Heisenberg. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENSINO DE QUÍMICA, 17., 2014, Ouro Preto, Mg. **Anais...** Ouro Preto: UFOP, 2014.

SANTOS, E. S.; SILVA, J. L. P. B. Princípio da incerteza e trajetórias de sistemas quânticos. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENSINO DE QUÍMICA, 18., 2016, Florianópolis, Sc. **Anais...** Florianópolis: UFSC, 2016

SILVA, J. L. P. B. **Plano de Curso de QUIA49 - Química Quântica I**. Salvador, 2016. Não publicado.

STUART JÚNIOR, J. B.; ZULIANI, S. R. Q. A. Descrição Física da Realidade e o Princípio de Incerteza: livros didáticos e vieses filosóficos. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENSINO DE QUÍMICA, 15., 2012, Salvador-BA. **Anais...**, Salvador: UFBA, 2012.

STUDART, N. A Invenção do Conceito de Quantum de Energia segundo Planck. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 22, n. 4, p. 523-535, 2000.

VIGOTSKI, L. S. **A Construção do Pensamento e da Linguagem**. São Paulo: Martins Fontes, 2001.

VIGOTSKI, L. S. **Formação Social da Mente**. São Paulo: Martins Fontes, 2008.

PRESTES, Z. **Quando não é quase a mesma coisa**. Campinas: Autores Associados, 2012.

WILSON, C. T. R. **On the cloud method of making visible ions and the tracks on ionizing particles**. (Nobel Lecture). Disponível em:

<[https://assets.nobelprize.org/uploads/2018/06/wilson-lecture.pdf?\\_ga=2.82309206.1936757534.1536145625-2117888958.1536145625](https://assets.nobelprize.org/uploads/2018/06/wilson-lecture.pdf?_ga=2.82309206.1936757534.1536145625-2117888958.1536145625)>. Acesso em: 22 mai. 2018.

## 8 APÊNDICES

Apêndice A – Quadro A1 referente aos conceitos utilizados no questionário de conhecimentos prévios.

Quadro A1: Conceitos utilizados no questionário de conhecimentos prévios.

Estudantes	Categoria 1 (impossibilidade)	Categoria 2 (Posição, momento ou velocidade)	Categoria 3 (simultaneidade)	Categoria 4 (interação dos corpos)	Categoria 5 (exatidão)	Categoria 6 (partícula subatômica)	Categoria 7 (respostas não adequada à questão)
1	s	c		s		s	
2	s	s/c	s		c	s	
3	s	c				s	
4	s	c	s			c	
5	s	c	c			s	
6	s	c	c	s	s	s	
7							
8	s	s/c				s	
9	s	c				c	
10	s	c	s	s		s	
11	s	c		s		c	
12	s	c		s	s	s	
13	s	s/c	c			s	
14							x
15	s	s/c				c	
16	s	s/c	s			s	
17	s						x
18							x
19	s	s/c	s			s	
20	s	c	s			c	
21							x
22							x
23	s	c				s	
24	s	c				s	
25	s	c				s	
26	s	c				s	
27		s				s	
28	s	c				s	
29	s	c	s	s		s	
30		c	c			s	
31	s	c	s			c	
32	s	s				s	
33	s	c	s			s	
34	s	s/c				s	
35	s	c				s	
36							x

**Observação:** o x no quadro corresponde às respostas inadequadas e aos estudantes que nunca ouviu falar do assunto; ouviu, mas, não lembra; não entendeu.



Apêndice C – Quadro referente aos termos utilizados na conceituação da 5ª questão que trata do exercício de número 4.

Quadro C1: Termos utilizados na conceituação das respostas nos itens 4.1 e 4.2

Termos Estudantes	Troca de Momento	Incerteza no Momento	Cálculo do Momento	Posição	Relação de incerteza ( $\Delta x \cdot \Delta p \cong h$ )	Trajectoria	Princípio da incerteza
1	C	C	C	C			
2	C	C	C	C	C	C	
3	S	C	C	C	C		
4	C	C	C	C			
5	C	C	C	C			
6	C	C	C	C			
7	C	C	C	C			
8	S	C	C	C		C	
9		C		C			
10		C	S	C	C		C
11	C	C	C	C			
12	S	C	C	C			C
13	C	S	C	C			
14	C	C	C	C			C
15	C	C	C	C			
16	S	S	C	C			
17	S	C	C	C			C
18	C	C	C	C			
19	C	C	C	C			
20	C	C	C	C			
21	S	C	C	C		C	
22							
23	S	S	C	C		C	
24	C	C	C	C			
25	S	S	C				
26	S	C	C	C	C		C
27	C	S	C	C			
28	C	C	C	C			
29	C	C	C	C			
30	C	C	C	C			
31	C	C	C	C			
32	C	C	C	C			

Apêndice D – Quadro referente aos termos utilizados pelos estudantes na conceituação das respostas da 1ª questão da prova da 3ª unidade.

Quadro D1: Termos utilizados na conceituação das respostas da 1ª questão da prova- 3ª unidade.

Termos Alunos	Princípio da Incerteza	Impossibilidade	Exatidão	Simultaneidade	Posição e Momento	Sistemas Atômico-Molecular e subatômico	Trajatória
1	C	C	C	C	C	C	C
2	C	S	S	S	C	C	C
3	C	S			C	C	C
4	C				C	C	C
5	C		S		C	C	S
6	C	C	C	C	C	C	S
7	C		S	C	C	C	C
8	S			C	S	C	C
9	C	S	C	C	C	C	C
10	C	C	S	C	C	C	C
11	C		S	C	C	S	S
12	S	S				C	
13	C	S	C	C	C	C	C
14	C	S	S	C	C	C	C
15	C	S	C	C	C	C	
16	C	S	C	S	C	C	C
17	C	S	C		C	C	C
18	C	C	C	C	C	C	
19	C	C	C		C	C	C
20	C		S	S	C	C	S
21	C	S		S	C	C	C
22	C	S	S		C	C	C
23	C	C	S	S	C	C	C
24							
25	C		C	C	C	C	C
26	C	C	S		C	C	C
27	C	S	C	C	C	C	C
28	C	S	C	S	C	C	C
29	C	S		C	C	C	C
30	C	S		C	C	C	C

## 9 ANEXOS

### 9.1 Anexo A

Trecho do texto acerca do princípio da incerteza escrito pelo professor e distribuído aos estudantes.

#### [...]Princípio da incerteza de Heisenberg

Heisenberg tomou conhecimento da contribuição de Schrödinger para a nova mecânica em elaboração, mas, discordou de sua interpretação da função de onda, pois estava convicto de que não era possível descrever o movimento dos elétrons no átomo. Algum tempo depois apresentou as relações de incerteza que pretendem mostrar tal impossibilidade a partir do processo de medida do movimento de um sistema quântico comparado a um sistema clássico.

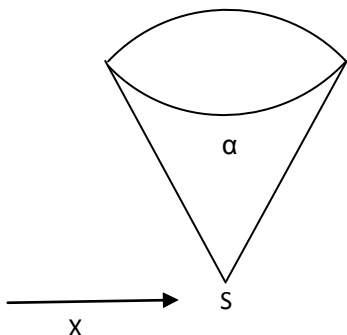
Uma trajetória consiste em um conjunto de posições de um sistema em sucessão temporal. Segundo a mecânica clássica (ver Ball, seção 9.2), para calcular a trajetória de um sistema, é preciso conhecer, ao menos, um valor de posição e de velocidade (ou momento). Por exemplo, no caso do movimento retilíneo uniforme, as soluções da equação de movimento são:  $x = x_0 + v_0 (t - t_0)$ . Assim, definido  $t_0$  e conhecidos  $x_0$  e  $v_0$ , podemos calcular a posição do sistema,  $x$ , a qualquer tempo,  $t$ . No caso das órbitas eletrônicas de Bohr, a equação da trajetória de um movimento circular uniforme é:  $\theta = \theta_0 + \omega_0 (t - t_0)$ . Para conhecermos a trajetória do elétron faz-se necessário conhecer  $\theta_0$  e  $\omega_0$  no tempo  $t_0$ .

As determinações das posições e velocidades são feitas, em geral, por observação ótica: lançamos um feixe de luz sobre o corpo e determinamos sua posição coletando a luz refletida; as leis de reflexão da ótica nos informam o local em que se dá a reflexão, que é o local onde se encontra o corpo. Para medir a velocidade são necessárias duas medições de posição em rápida sucessão: a razão  $\Delta x/\Delta t$  dá a velocidade.

No caso de sistemas macroscópicos (clássicos), a reflexão da luz pelo sistema não afeta significativamente sua trajetória, pois a energia do sistema é muito maior que a energia do feixe de luz. No caso de sistemas quânticos, a

interação com a luz pode provocar variação apreciável na velocidade (ou momento) do sistema, gerando alteração em sua trajetória original.

Suponha que um fóton foi lançado na direção  $x$  em que o sistema (S) se move, sofre deflexão e segue em direção à objetiva de um microscópio, podendo ser detectado dentro do ângulo indicado na figura ao lado, do qual  $\alpha$  é a metade. Uma vez que não há como identificar o ponto exato da objetiva que o fóton irá alcançar, haverá uma incerteza na determinação de  $x$ , dada pelo poder de resolução da objetiva:  $\Delta x \cong \lambda / \text{sen } \alpha$ .



Por outro lado, o sistema sofrerá uma variação do momentum (por efeito Compton) igual a  $\Delta p \cong (h/\lambda) \text{sen } \alpha$ . Multiplicando as duas incertezas, tem-se:  $\Delta x \cdot \Delta p_x \cong h$ .

Note que, para diminuir a incerteza na medida da posição ( $\Delta x$ ), é necessário diminuir o comprimento de onda da luz e aumentar sua frequência, aumentando a energia do fóton e, conseqüentemente, a incerteza na medida do momentum ( $\Delta p_x$ ). Ao tentar diminuir a incerteza na medida do momentum ( $\Delta p_x$ ), aumenta-se o comprimento de onda, o que leva a uma incerteza maior na medida da posição ( $\Delta x$ ).

Exercício:

Para justificar esta afirmativa, é suficiente comparar a energia cinética de um sistema com 2g, movendo-se a 1m/s,  $E = 10^{-3}$  J, com a energia de um fóton de raios  $\gamma$  (gama), com alta frequência, da ordem de  $10^{20} \text{ s}^{-1}$ , cuja energia é da ordem de  $10^{-13}$  J.

[...]



## 9.2 Anexo B

### TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

O **Estudo do Ensino da Teoria Quântica para Químicos** (doravante referido como **Estudo**) é um projeto de investigação sobre estratégias de ensino da teoria quântica para químicos e a conseqüente avaliação na aprendizagem dos estudantes.

O **Estudo** é conduzido por professores e estudantes do Grupo de Pesquisa em Ensino de Ciências e Formação de Professores da UFBA, vinculado ao Programa de Pós-Graduação em Ensino, Filosofia e História das Ciências das UFBA/UEFS.

O/A Sr/a. é convidado/a a participar do **Estudo**, o que envolve:

1 - Permitir aos pesquisadores registrar por escrito, em gravações de áudio e de imagens as aulas e atividades da disciplina QUIA49 - Química Quântica I, bem como facultar o acesso aos seus trabalhos escolares e avaliações de aprendizagem, autorizando-lhes fotocopiá-los para fim de pesquisa.

2 - Fornecer entrevista(s) aos pesquisadores do **Estudo** a respeito do ensino e da aprendizagem da teoria quântica. As entrevistas serão gravadas e transcritas para obtenção de informações necessárias à pesquisa. As gravações e transcrições serão guardadas em segurança até o fim do **Estudo**, quando serão destruídas.

Sua participação é inteiramente voluntária, sem qualquer pagamento. O/A Sr/a. poderá deixar de responder a qualquer pergunta durante a entrevista, bem como deixar de participar da pesquisa a qualquer momento.

Todas as informações obtidas do/a Sr/a. serão confidenciais, às quais só terão acesso os pesquisadores do **Estudo**. Serão usadas apenas para os fins da pesquisa. A publicação dos resultados da pesquisa poderá conter trechos das entrevistas, dos trabalhos escolares e das avaliações, porém, mantendo o sigilo a respeito da real identidade dos entrevistados. Quando necessário, serão empregados nomes fictícios e/ou codificados para identificar os entrevistados.

Caso concorde em participar desta pesquisa, por favor, preencha a tabela das informações abaixo e assine este documento.

Este Termo de Consentimento Livre e Esclarecido é assinado em duas vias, uma para o/a Sr/a e outra para o **Estudo**. Caso deseje maiores esclarecimentos, solicitar ao/à entrevistador/a.

Declaro que compreendi as informações apresentadas neste documento e dou meu consentimento para participação no **Estudo**.

Nome	
Telefone(s)	
E-mail	

Salvador, \_\_\_ / \_\_\_ / \_\_\_\_\_.

Assinatura:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Pesquisador/a	
Assinatura	

### 9.3 Anexo C

#### QUIA49 - LEVANTAMENTO DE CONHECIMENTO PRÉVIO AO ENSINO - 2016.1

Você já estudou alguns aspectos do modelo atômico quântico em outras disciplinas, de modo que, gostaríamos de conhecer o que sabe sobre alguns pontos, para programarmos o ensino de acordo com seus conhecimentos.

Não deixe nenhuma questão sem resposta: informe se nunca ouviu falar do assunto; se ouviu, mas, não lembra; se não entendeu etc.

Coloque seu nome nas folhas de respostas e numere suas respostas com os mesmos números das questões, para estabelecermos a relação.

1. Se tivesse que explicar para alguém que não conhece **o significado do termo quântico/a**, o que diria?
2. Se tivesse que explicar para alguém que não conhece a **dualidade onda-partícula**, o que diria?
3. Se tivesse que explicar para alguém que não conhece os **números quânticos**, o que diria?

4. Se tivesse que explicar para alguém que não conhece o **princípio da incerteza de Heisenberg**, o que diria?
5. Se tivesse que explicar para alguém que não conhece uma **função de onda associada a um elétron num átomo**, o que diria?
6. Se tivesse que explicar para alguém que não conhece a **interpretação probabilística da função de onda**, o que diria?
7. Se tivesse que explicar para alguém que não conhece um **orbital atômico**, o que diria?
8. Se tivesse que explicar para alguém que não conhece o **spin**, o que diria?