

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO – PRPPG
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DAS CIÊNCIAS**

**PENSAMENTO TRANSDISCIPLINAR: UMA ABORDAGEM PARA
COMPREENSÃO DO PRINCÍPIO DA DUALIDADE DA LUZ**

Paulo Fernando Lima de Souza

Recife

2009

FICHA CATALOGRÁFICA

S729p Souza, Paulo Fernando Lima de
Pensamento transdisciplinar : uma abordagem para compreensão do princípio da dualidade da luz / Paulo Fernando Lima de Souza. -- 2009.
123 f. : il.

Orientador : Romildo Albuquerque Nogueira
Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências – Universidade Federal Rural de Pernambuco. Departamento de Educação.
Inclui anexo, apêndice e bibliografia.

CDD 539

1. Transdisciplinaridade
 2. Dualidade da luz
 3. Ciclo de Kelly
- I. Nogueira, Romildo Albuquerque
 - II. Título

Paulo Fernando Lima de Souza

**PENSAMENTO TRANSDISCIPLINAR: UMA ABORDAGEM PARA
COMPREENSÃO DO PRINCÍPIO DA DUALIDADE DA LUZ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino das Ciências da Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação da Universidade Federal Rural de Pernambuco como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Ensino das Ciências.

Orientador: Prof. Romildo de Albuquerque Nogueira, Dr.

Coorientadores: Prof.^a Heloisa Flora Brasil Nóbrega Bastos, PhD.

Prof. Ernande Barbosa da Costa, Dr.

Recife

Fevereiro de 2009

PAULO FERNANDO LIMA DE SOUZA

**PENSAMENTO TRANSDISCIPLINAR: UMA ABORDAGEM PARA
COMPREENSÃO DO PRINCÍPIO DA DUALIDADE DA LUZ**

Aprovado em 16 de fevereiro de 2009

Banca Examinadora

Prof. Romildo de Albuquerque Nogueira, Dr. UFRPE – Presidente

Prof. Antônio Carlos Silva Miranda, Dr. UNICAP – 1º Examinador

Prof^a. Heloisa Flora Brasil Nóbrega Bastos, PhD. UFRPE – 2º Examinador

Prof. Alexandro Cardoso Tenório, Dr. UFRPE – 3º Examinador

DEDICATÓRIA

A Deus e aos meus queridos Pais Ageu Ferreira de Souza, representante de medicamentos, e Neusa Lima de Souza, professora de Ciências Sociais, ambos aposentados, meu alicerce de caráter, dignidade e ética, enquanto ser humano.

AGRADECIMENTOS

A Deus, aos meus queridos Pais Ageu e Neusa, aos meus irmãos: José Augusto e família e Sergio Ricardo e esposa Rebeca.

Ao orientador e professor Romildo Albuquerque Nogueira, por sua paciência e dedicação, mostrando sempre ser além de educador, um grande cientista por seu espírito de pesquisa no campo da Biofísica.

Aos coorientadores professores: Heloisa Bastos, por ter contribuído de forma significativa para a confecção desta dissertação e Ernande Barbosa, por ser atencioso e prestativo durante o processo de construção e ainda ter cedido sua sala de aula, para realização do campo de pesquisa.

Ao professor e Biofísico George Jimenez Chaves do Departamento de Morfologia e Fisiologia Animal pelo empréstimo do experimento cuba de onda, permitindo desta forma a execução de uma das etapas da pesquisa.

À diretora do Colégio Presbiteriano Agnes, Edinar Andrade Baia pelo incentivo, compreensão, e às coordenadoras Wilma Costa e Graças Têti, pelo apoio e compreensão durante o período do mestrado, educadoras que fazem do colégio Agnes, uma instituição de ensino de qualidade.

A minha querida colega professora de português, Celeste por ter realizado as devidas correções ortográficas.

A Kilma Lima, minha amiga de mestrado, um exemplo de ser humano pela qual tenho muito carinho, por suas orientações pedagógicas e leituras direcionadas que nos permitiram evoluir no meio acadêmico.

Aos colegas da turma de mestrando de 2007, em especial a Ana Lúcia, Ana Rita, Jacineide e Thiago pela amizade construída durante o mestrado.

Santo! Santo! Santo!
Deus dos exércitos,
A terra e os céus
Proclamam a tua glória
Glória a ti, glória a ti, ó Deus,
Eternamente. Amém.
(S. P. Kalley)

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - As cinco etapas do Ciclo da Experiência.....	44
FIGURA 2 - Cuba de onda.....	53
FIGURA 3 - Difração e figuras de interferência (a) e Interferência modulada pela difração (b)	55
FIGURA 4 - Cuba de onda em funcionamento.....	56
FIGURA 5 - Dupla fenda de Young.....	57
FIGURA 6 - Difração produzida por um raio laser (a) e Franjas de interferência (b).....	59
FIGURA 7 - Radiômetro de Crookes.....	60
FIGURA 8 - Radiômetro de Crookes em funcionamento.....	62
FIGURA 9 - Software simulando o comportamento de onda mecânica.....	63
FIGURA 10 - Software simulando o comportamento de onda luminosa.....	64
FIGURA 11 - Um vídeo Dr. Quantum.....	65

SUMÁRIO

	RESUMO	
	ABSTRACT	
1	INTRODUÇÃO.....	13
2	PRINCÍPIO DA DUALIDADE DA LUZ.....	18
2.1	Luz.....	18
2.2	A natureza corpuscular da luz: Fótons.....	20
2.2.1	Efeito fotoelétrico.....	20
2.2.2	Espalhamento Compton.....	21
2.3	Átomos e moléculas de luz.....	21
2.4	Onda associada à matéria.....	22
2.5	A interpretação das funções de onda.....	23
2.6	Uma breve história de De Broglie: O príncipe Louis de Broglie.....	24
2.7	Um pouco mais sobre a Hipótese de Louis de Broglie.....	25
2.8	O Princípio da Incerteza de Werner Heisenberg.....	26
3	TRANSDISCIPLINARIDADE E SEUS PILARES.....	29
3.1	O surgimento do termo Transdisciplinar	29
3.2	Definição da Transdisciplinaridade e os congressos internacionais.....	30
3.3	Os três pilares da metodologia da pesquisa Transdisciplinar	32
3.4	Definições de Multidisciplinar, Pluridisciplinar, Interdisciplinar e Transdisciplinar.....	33
3.5	A lógica do terceiro incluído e os diferentes níveis de Realidade.....	34
3.6	A Complexidade.....	38
4	A PSICOLOGIA DOS CONSTRUTOS PESSOAIS DE GEORGE KELLY.....	41

4.1	A teoria dos construtos pessoais.....	41
4.2	Corolário da Experiência.....	48
4.3	Ciclo da Experiência de Kelly.....	48
5	METODOLOGIA.....	50
5.1	Caracterização do sujeito e campo de pesquisa.....	50
5.2	Instrumentos de pesquisa	50
5.3	Passos metodológicos.....	50
5.4	Detalhando os três experimentos e a oficina Transdisciplinar	52
5.4.1	Experimento 1: Cuba de onda.....	53
5.4.2	Experimento 2: Dupla fenda de Young.....	57
5.4.3	Experimento 3: Radiômetro de Crookes.....	60
5.4.4	Oficina Transdisciplinar.....	62
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	68
6.1	Análise da I etapa do Ciclo da Experiência (Antecipação).....	68
6.2	Análise da II etapa do Ciclo da Experiência (Investimento).....	73
6.3	Análise da III etapa do Ciclo da Experiência (Encontro).....	77
6.4	Análise da IV etapa do Ciclo da Experiência (Confirmação ou Desconfirmação).....	84
6.5	Análise da V etapa do Ciclo da Experiência (Revisão Construtiva).....	86
6.6	Análise comparativa da evolução conceitual.....	92
7	CONCLUSÕES.....	101
8	REFERÊNCIAS.....	105
9	APÊNDICE A - Questionário de pesquisa.....	109
9.1	APÊNDICE B - Um texto introdutório sobre o Princípio da Dualidade da Luz e o	

	Pensamento Transdisciplinar.....	110
9.2	APÊNDICE C - Questionário de sondagem.....	113
9.3	APÊNDICE D - Plano de Aula I.....	114
9.4	APÊNDICE E - Plano de Aula II.....	115
9.5	APÊNDICE F - Plano de Aula III.....	116
9.6	APÊNDICE G - Plano de Aula IV.....	117
10	ANEXO A – Carta da Transdisciplinaridade.....	119
10.1	ANEXO B – Esquema de pesquisa da etapa de <i>encontro</i> de Kelly.....	123

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi investigar, numa turma de alunos da Licenciatura em Física da UFRPE, se o Pensamento Transdisciplinar pode contribuir para a compreensão do Princípio da Dualidade da Luz. A metodologia empregada foi o Ciclo da Experiência de Kelly, que teve a perspectiva de engajar os alunos em um processo de aprendizagem, com o auxílio de três experimentos didáticos: a cuba de onda, a dupla fenda de Young e o radiômetro de Crookes. A partir desses experimentos foi possível motivar uma discussão sobre as propriedades ondulatórias e corpusculares da luz. Uma oficina sobre a Transdisciplinaridade foi também realizada com o intuito de discutir a lógica do terceiro incluído, uma lógica que se adequa ao fato da luz se comportar como onda e como partícula. As análises dos dados permitiram as seguintes conclusões: (i) as concepções prévias dos estudantes da Licenciatura em Física da UFRPE acerca do Princípio da Dualidade da Luz eram desprovidas de uma lógica que respaldasse tal Princípio e (ii) os três experimentos propostos e a oficina sobre a Transdisciplinaridade, realizadas durante o Ciclo da Experiência Kellyana, contribuíram para que os estudantes tivessem uma maior compreensão do Princípio da Dualidade da Luz.

Palavras-chave: Transdisciplinaridade. Princípio da Dualidade da Luz. Experimentos didáticos. Ciclo da Experiência kellyana.

ABSTRACT

The objective of this work was to investigate if transdisciplinarity can contribute to the understanding of the wave-particle duality principle. The investigation was conducted with students from the Physics teaching course at UFRPE. The methodology used was Kelly's Experience Cycle, in which the objective was to involve the students in a learning process through three experiments: the wave tank; the Young experiment and Crookes' radiometer. These three experiments motivated a discussion about wave-particle duality. A transdisciplinary didactic workshop was conducted aiming to promote a discussion about third included logic, an adequate logic to be applied to wave-particle duality. The data analysis allowed the following conclusions: (i) the students from the Physics teaching course at UFRPE had a previous concept about the wave-particle duality principle, but without a logic subjacent to this principle; (ii) the three experiments and the transdisciplinary workshop conducted during Kelly's Experience Cycle contributed for a better comprehension about the wave-particle duality principle.

Keywords: transdisciplinarity, wave-particle duality principle, didactic experiments and Kelly's Experience Cycle.

1 INTRODUÇÃO

O aluno deve se sentir desafiado pelo jogo do conhecimento.
Deve adquirir espírito de pesquisa e desenvolver a
capacidade de raciocínio e autonomia (PCNEM, 1999)

Os Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio (PCNEM) de Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias propõem que as escolhas sobre o que ensinar se devem pautar na seleção de conteúdos e de temas relevantes que contemplem o mundo natural, social, político e econômico. Assim, o ensino da Física deve ser ministrado, objetivando uma melhor compreensão do mundo, visando à formação do educando como cidadão. Dentro dessa visão, os estudantes do ensino médio deverão estar aptos para compreender os conceitos científicos que respaldam as tecnologias envolvidas na construção de equipamentos eletroeletrônicos, sensores, e outros. Diante dessa realidade, é importante que a Física Moderna seja ministrada já no ensino médio.

De acordo com os PCNEM,

O ensino de Física, frequentemente, é realizado mediante a apresentação de conceitos, leis e fórmulas, de maneira desarticulada, distanciados do mundo vivido pelos alunos e professores e não só, mas também por isso, vazio de significado (PCNEM) (BRASIL, p.229, 1999).

Desta forma, o ensino da Física está em desacordo com as diretrizes dos Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio, cuja proposta tem, como principal objetivo, a busca de significado do conteúdo ensinado e sua adequação à realidade do educando, afirmando que o aluno deve se sentir desafiado pelo jogo do conhecimento e adquirir espírito de pesquisa, desenvolvendo assim sua capacidade de raciocínio e autonomia para preparação para o mercado de trabalho e o convívio em sociedade. O ensino da Física deve ser voltado para uma realidade do cotidiano do estudante, possibilitando-lhe, competências e habilidades que permitam apropriação para sua vida enquanto cidadão.

Segundo os Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (PCNEM),

A Física é uma área do conhecimento que permite elaborar modelos de evolução cósmica, investigar os mistérios do mundo submicroscópico, das partículas componentes da matéria, simultaneamente permitindo desenvolver novas fontes de energia e criar novos materiais, produtos e tecnologia (BRASIL, 1999, p. 229).

Portanto, ela não pode ser desenvolvida na sala de aula como algo alheio ao ambiente, afinal, um dos seus objetivos principais é compreender os fenômenos físicos da natureza. Estes objetivos são dos próprios PCNEM de Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias, que propõem conteúdos e temas relevantes envolvendo o mundo natural, social, político e econômico.

Neste contexto se insere o ensino da Física Moderna no ensino médio, que atualmente faz parte dos conteúdos requeridos nos vestibulares de várias universidades brasileiras, inclusive UFPE, UFRPE, UPE e UNICAP. Um tópico ensinado na Física Moderna é o Princípio da Dualidade da Luz. Tal Princípio afirma que a luz possui uma natureza dual, comportando-se, em alguns fenômenos, como uma onda e, em outros, como partícula. São várias as tecnologias que utilizam as propriedades ondulatórias e corpusculares da luz, entre elas podem-se citar os leitores óticos, as fotocélulas e outros, advindo daí o grande interesse pelo assunto a ser pesquisado.

Nessa perspectiva, o ensino da Física Moderna deve ser ministrado visando a uma melhor compreensão do mundo e à formação dos educandos como cidadãos. No entanto, o ensino atual, no Brasil, ainda aborda os conteúdos de forma fragmentada, não permitindo ao educando uma visão do todo lecionado e muito menos as suas aplicações tecnológicas.

A lógica que permeia essa prática disciplinar está respaldada no pensamento linear, tendo como ícones Aristóteles e Descartes. Este pensamento procura simplificar a complexidade inerente aos sistemas e explicar, de maneira cartesiana, o todo pelas propriedades das partes separadas. A lógica do terceiro excluído de Aristóteles e os preceitos de Descartes formam a base dessa lógica.

Com esse enfoque, a lógica Aristotélica, tão utilizada no nosso cotidiano, é inadequada para explicar o Princípio da Dualidade da Luz, pois se respalda na exclusão, na lógica binária, e por essa lógica, a luz deveria comportar-se ou como uma onda, ou como uma partícula. No

entanto, uma visão Transdisciplinar, embasada na lógica do terceiro incluído, poderá ser útil na compreensão do aspecto dual da luz.

Diante do exposto, justifica-se investigar se a Transdisciplinaridade pode realmente auxiliar ou não a compreensão do Princípio da Dualidade da Luz.

Surge então a Transdisciplinaridade que tem, na complexidade, um dos seus pilares, e que expande a lógica Aristotélica do terceiro excluído (isso ou aquilo) e abre as portas para a lógica do terceiro incluído (isso e aquilo). É difícil aceitar a lógica do terceiro incluído alguém que passou toda vida pensando só existirem duas opções para o “ser” das coisas: “ou elas são isso, ou são aquilo”, “ou uma coisa ou outra”. A lógica do terceiro incluído nos mostra que é possível ser “uma coisa e outra também”, assim essa ideia permite ser a luz onda e partícula.

Outro pilar da Transdisciplinaridade são os diferentes níveis de Realidade, um conceito que pode auxiliar na compreensão da dualidade da luz, pois permite entender o Princípio da Dualidade, através das diferentes realidades em seus contextos macroscópico e microscópico. As leis que regem a Física clássica diferem das leis que regem a Física quântica, e só por princípios quânticos é possível explicar os fenômenos em níveis quânticos.

Dessa maneira, é importante pesquisar e discutir como se processam as concepções dos estudantes acerca do Princípio da Dualidade da Luz e quais as dificuldades verificadas na compreensão desse Princípio, para, então, buscar soluções a fim de poder superá-las. Espera-se que a nova visão de mundo, baseada na complexidade, nos diferentes níveis de Realidade e na lógica do terceiro incluído, possa contribuir significativamente para a compreensão do Princípio da Dualidade da Luz.

Para tanto, levantamos a seguinte questão: Como o Pensamento Transdisciplinar pode auxiliar na compreensão do Princípio da Dualidade da Luz?

A fim de responder à questão proposta será realizada uma intervenção didática, usando uma abordagem com três experimentos contemplando o comportamento da luz, como onda e como partícula. Os experimentos escolhidos foram: a cuba de onda; a dupla fenda de Young e o radiômetro de Crookes ou moinho de luz. Além desses experimentos, será realizada uma Oficina Transdisciplinar visando à discussão de textos sobre o Pensamento Transdisciplinar e

seus pilares, uma vez que o objetivo de nossa pesquisa será identificar as concepções dos estudantes universitários da Licenciatura em Física da UFRPE acerca do Princípio da Dualidade da Luz, verificando quais as possíveis contribuições do Pensamento Transdisciplinar na construção desse conceito.

Para isso, nossos objetivos específicos foram: 1. investigar as concepções dos estudantes sobre o Princípio da Dualidade da Luz; 2. verificar a evolução conceitual do grupo de educandos, ao longo do processo da intervenção didática, acerca deste Princípio e 3. analisar a possível contribuição do uso do Pensamento Transdisciplinar na compreensão do Princípio da Dualidade da Luz.

Salientamos que o ensino de Ciências tem considerado relevante a utilização de atividades experimentais, na sala de aula ou fora dela, realizando práticas no laboratório, como essencial para a aprendizagem científica. A experimentação é essencial para um bom ensino de Ciências, em parte, isso se deve ao fato de que o uso de atividades práticas permite maior interação entre o professor e os alunos, proporcionando, em muitas ocasiões, a oportunidade de um planejamento conjunto e o uso de estratégias de ensino que podem levar à melhor compreensão dos conceitos de Ciências (MORAES, 2000).

Falar de experimentação no ensino de Ciências remete às concepções do professor sobre o que ensinar e o que significa aprender, o que é Ciências e com isto, o papel atribuído à experimentação adquire vários significados para a nossa reflexão como educador (MORAES, 2000).

Para entender como os estudantes elaboram suas construções conceituais sobre o Princípio da Dualidade onda-partícula, será usado como estratégia da pesquisa o Ciclo da Experiência de George Kelly. Este Ciclo é formado por cinco etapas que serão aplicadas durante o processo de intervenção, sendo três experimentos, mais a etapa da oficina com o objetivo de abordagem do Pensamento Transdisciplinar.

Segundo Kelly, a experiência vivenciada é indispensável na formação de construtos, quando diz que “à medida que as antecipações ou hipóteses de uma pessoa são sucessivamente revisadas, seu sistema de eventos se modifica. Reconstrói”.(Corolário da Experiência) (MOREIRA, 1999, p.133) Este corolário apresenta 5 etapas, denominadas de Ciclo da

Experiência, que consiste em: *antecipação, investimento, encontro, confirmação ou desconfirmação e revisão construtiva.*

Para isso, será aplicado o Ciclo da Experiência numa turma de Instrumentação para o Ensino da Física II do 8º período da UFRPE, com o intuito de investigar os conceitos prévios e, após a intervenção didática, sobre o Princípio da Dualidade da Luz.

Durante a pesquisa, os sujeitos da pesquisa foram envolvidos e desafiados a interagir e a discutir as bases do Pensamento Transdisciplinar e as três práticas experimentais, permitindo assim, que houvesse subsídios para analisar a evolução conceitual e a compreensão dos estudantes sobre o Princípio da Dualidade da Luz.

2 O PRINCÍPIO DA DUALIDADE DA LUZ

Todos estes cinquenta anos de meditação consciente não me permitiram responder à questão: “O que é um quantum de luz?” Hoje, cada Paulo ou Pedro ou João pensa que o sabe, mas eles se enganam. **Albert Einstein a Besso, 12 dezembro de 1951** (MOURÃO, 2005)

2.1 Luz

As indagações sobre a natureza da luz surgiram muito cedo na história da humanidade. Demócrito, filósofo grego que viveu entre cerca de 460 / 470 a 370 / 380 a.C., fez numerosas viagens pelo Egito, entre outros lugares, antes de permanecer na Grécia. Tendo como mestre principal Leucipo (490 a.C), Demócrito apropriou-se dos conceitos atomistas da Ásia Menor. A teoria atomística pregava que toda a matéria era formada de minúsculas partículas, quase infinitesimalmente pequenas, tão pequenas que nada poderia ser menor que elas. Sendo estas partículas indivisíveis, elas receberam o nome de *átomos* que em grego significa *não divisível*. Os átomos seriam eternos imutáveis e indestrutíveis. Eles diferem uns dos outros por suas características físicas. Em particular, a luz, que era associada ao fogo, seria constituída de átomos pontiagudos (tetraédricos), de forma a provocar queimaduras dolorosas (BARTHEM, 2005).

O modelo corpuscular de Demócrito era baseado na intuição e na pureza de ideias, filosofia que ficou conhecida como *filosofia moral*. Aristóteles (384 a 322 a.C), preceptor (mestre) de Alexandre, o Grande, durante a sua infância, foi discípulo de Platão. Contudo, Aristóteles introduziu a teoria das sensações, base da teoria natural que atualmente é conhecida como Ciência. Baseando-se nos órgãos sensoriais, já que, na época, não havia outros tipos de sensores, Aristóteles propôs para a luz, uma explicação similar à que ele havia dado às vibrações sonoras, percebidas tanto pelos ouvidos como pelo tato. Segundo ele, um objeto luminoso vibra e, desta forma, coloca em vibração um meio indefinido, que o filósofo chamou de “diáfano”, o qual, por sua vez provoca o movimento de “humores” que entram na composição do olho. Era uma analogia baseada apenas em associações (BARTHEM, 2005).

Os gregos tinham muitas ideias, mas não possuíam uma tradição experimental de realizar observações físicas sobre a natureza. Os fenômenos naturais comuns não podiam ser

corretamente estudados com os recursos de que se dispunham e, portanto, qualquer argumento era satisfatório, desde que fosse bem defendido. Segundo Barthem (2005), a filosofia neoplatônica, ou filosofia moral, dominou o fim da antiguidade e a primeira metade da Idade Média, tanto na Europa como nos países mulçumanos.

Também a questão de saber se a luz consiste em feixe de partículas ou é o resultado da propagação de ondas em movimento é uma das mais interessantes na história da Ciência.

Isaac Newton (1642-1727) utilizou uma teoria fundamentada em partículas de luz, para explicar as leis da reflexão e da refração. Para o fenômeno da refração, porém, Newton precisou aceitar que a luz se propagava mais rapidamente na água ou no vidro do que no ar, no entanto, esta suposição foi refutada posteriormente. Os principais responsáveis pela teoria ondulatória foram Robert Hooke (1635-1703) e Christian Huygens (1629-1695), que explicaram a refração, admitindo que a luz se propagava mais lentamente na água ou no vidro que no ar (TIPLER e MOSCA, 2006). Newton rejeitou a teoria ondulatória, pois, em sua época, acreditava-se que a luz só propagava em linha reta, por esse motivo o fenômeno da difração ainda não havia sido reconhecido. Diante da sua reputação e da sua autoridade à frente da comunidade científica, a teoria corpuscular da luz foi aceita por mais de um século (TIPLER e MOSCA, 2006).

Em 1801, Thomas Young (1773-1829) demonstrou, através de experiência, a natureza ondulatória da luz. Nessa experiência, usando-se duas fontes coerentes de luz produzidas por meio da iluminação de um par de fendas paralelas e estreitas com uma única fonte luminosa, foi mostrado que a luz ao deparar-se com uma pequena abertura age como uma nova fonte puntiforme de ondas. O experimento de Young e muitos outros experimentos realizados demonstraram que a luz se propaga como uma onda, sendo o fenômeno da difração da luz e da existência de uma figura de interferência na experiência das duas fendas, uma evidência das propriedades ondulatórias da luz.

No início do século XIX, o físico francês Augustin Fresnel (1788-1827) realizou algumas experiências sobre os fenômenos da interferência e da difração, apresentando a teoria ondulatória sobre uma sólida base matemática, mostrando que a propagação retilínea da luz é resultado dos comprimentos de onda muito pequenos da luz visível (TIPLER e MOSCA, 2006).

No entanto, a teoria ondulatória clássica da luz chegou ao auge em 1860, quando James Clerk Maxwell (1831-1879) publicou sua teoria através de expressões matemáticas do eletromagnetismo. Esta teoria previa a existência da luz como uma onda que se propagava de $3,0 \cdot 10^8$ m / s, que é igual à velocidade da luz, o que sugeriu a Maxwell ser a luz uma onda eletromagnética (TIPLER e MOSCA, 2006).

No início do século XX, acreditava-se que o som, a luz e outras radiações eletromagnéticas eram ondas; e os elétrons, os prótons, átomos eram partículas. Nos primeiros 30 anos do século, porém, ocorreram descobertas importantes na Física teórica e experimental, e percebeu-se que a luz, descrita como uma onda pode trocar energia em pacotes discretos, ou *quanta*, tal como as partículas. Já o elétron, que se pensava ser partícula apresentava efeitos de difração e de interferência conforme se propagavam no espaço tal como uma onda (TIPLER e MOSCA, 2006).

O fato de a luz trocar energia como uma partícula implica que a troca não ocorra de forma contínua, mas de maneira *quantizada*. De modo semelhante, a natureza ondulatória do elétron, diante do fato de que a condição de onda estacionária requer um conjunto discreto de frequência, implica que a energia de um elétron, em região limitada do espaço não seja contínua, mas quantizada, admitindo um conjunto discreto de valores (TIPLER e MOSCA, 2006).

Agora passamos abordar, não mais a natureza ondulatória da luz, e sim, a natureza corpuscular da luz. O primeiro uso do conceito de fóton ocorreu para explicar os resultados das experiências relativas ao efeito fotoelétrico.

2.2 A natureza corpuscular da luz: fótons

2.2.1 Efeito fotoelétrico

A natureza quântica da luz e a quantização da energia foram sugeridas por Albert Einstein, em sua explicação sobre o efeito fotoelétrico. Esse efeito consiste na retirada de elétrons da superfície de um metal quando a energia incide sobre a mesma. Tal fenômeno foi descoberto em 1887 pelo cientista alemão Heinrich Hertz (1857-1894), porém a explicação foi dada por Einstein em 1905. Segundo este cientista, a explicação do fenômeno é imediata quando se encara o efeito como resultado de uma “colisão” entre um fóton incidente e um elétron do

metal. O corpo metálico, ao receber energia, a energia de cada fóton é totalmente absorvida pelo metal que emite elétrons de alta energia. Os elétrons emitidos pelo metal são chamados de fotoelétrons e o fenômeno, de efeito fotoelétrico (HALLYDAY et al.1995).

Atualmente a maioria das pessoas tem familiaridade com aplicações desse efeito, como nas portas automáticas de um shopping e de bancos, que se abrem automaticamente e, também, nos efeitos de fotocélulas utilizados nos postes de iluminação pública. Quando se investiga cuidadosamente tal efeito num laboratório, verifica-se que os resultados experimentais não podem ser explicados, de maneira alguma, em termos do modelo ondulatório da luz (HALLYDAY et al.,1995).

Apesar das maiores contribuições de Albert Einstein à Física terem sido a teoria da relatividade restrita e a teoria da relatividade geral, o comitê Nobel da Academia Real das Ciências da Suécia lhe atribuiu o prêmio Nobel de Física de 1921, por explicar o efeito fotoelétrico (MOURÃO, 2005).

2.2.2 Espalhamento Compton

O uso do conceito de fótons serviu para explicar os resultados das experiências relativas ao efeito fotoelétrico do mesmo modo, o conceito de fótons foi usado por Arthur H. Compton, em 1923, para esclarecer os resultados de suas medidas relativas ao espalhamento dos raios X por elétrons. Segundo a teoria clássica, se uma onda eletromagnética incidir sobre uma matéria, contendo cargas elétricas, as cargas oscilarão com essa frequência e irradiarão ondas eletromagnéticas de mesma frequência. Compton interpretou essas ondas irradiadas como fótons espalhados e mostrou que se o processo de espalhamento fosse uma colisão entre um fóton e um elétron, este absorveria parte dessa energia e um novo fóton, denominado espalhado, se propagaria com uma energia menor que a do fóton incidente, portanto, com uma frequência menor que a do fóton incidente (TIPLER e MOSCA, 2006).

2.3 Átomos e moléculas de luz

No ano de 1922, o físico Louis de Broglie escreveu seus dois primeiros artigos teóricos a respeito dos quanta de luz. Analisou-os como partículas, com massa de repouso não nula, fazendo uso, em sua pesquisa, da teoria da relatividade especial. De Broglie aplicou, aos quanta de luz, tanto a relação de Energia de Planck ($E = h\nu$, onde ν é a frequência e h a constante de Planck) quanto à de Einstein ($E = mc^2$, onde m é a massa e c a velocidade da

luz). Isso é algo que Albert Einstein não havia realizado. Curiosamente, as partículas de luz não teriam a velocidade da luz por causa do limite relativístico, porém, a velocidade seria tão próxima dela que não seria possível notar a diferença. A diferença entre um fóton de luz e outro é sua frequência (SÉRGIO e ANDRADE, 2007). De Broglie procurou explicar e entender a radiação do corpo negro de Planck, com a hipótese puramente corpuscular, porém acrescentando a ideia de que os “átomos de luz” poderiam se unir, formando “molécula de luz” que teriam dois, três ou mais quanta (SÉRGIO e ANDRADE, 2007).

2.4 Onda associada à matéria

No ano de 1923, De Broglie relacionou a vibração das ondas aos corpúsculos de luz, tendo a necessidade de continuar fazendo o uso da teoria da relatividade de Einstein; e, quase simultaneamente, transferir a mesma ideia a elétrons e a outras partículas. Procurando associar ondas de átomos de luz, tornava-se desta maneira, possível a explicação dos fenômenos luminosos de interferência e de difração do ponto de vista da mecânica ondulatória (SÉRGIO e ANDRADE, 2007). “Os fenômenos de difração e da interferência são propriedades ondulatórias (TIPLER, 1984, p.441)”. De certa forma, a teoria que desenvolveu não fazia separação entre os quanta de luz e as partículas materiais, deveriam existir dessa maneira, ondas associadas aos elétrons e a outros corpúsculos. Com base nessa ideia, De Broglie conseguiu explicar a teoria do átomo de Böhr, mostrando que as órbitas estáveis eram aquelas em que as oscilações associadas aos elétrons formam ondas estacionárias (SÉRGIO e ANDRADE, 2007).

Existia um aspecto muito importante nas ondas de De Broglie que é o fato de elas terem uma velocidade maior que a da luz e não acompanharem os corpúsculos, ou seja, a velocidade da onda é a chamada *velocidade de fase*, e a velocidade da partícula é igual á *velocidade de grupo* de um conjunto de ondas com frequência muito próxima (SÉRGIO e ANDRADE, 2007). Essa confirmação se deu na Física clássica, por existir esse conceito e sabia-se que a energia de um grupo de ondas caminha com velocidade de grupo. Desta forma, a teoria de De Broglie tornava-se mais forte.

2.5 A interpretação das funções de ondas

Em 1924, o físico francês Louis de Broglie apresentou uma hipótese de que a luz poderia ter um caráter duplo de onda e de partícula, enquanto matéria. Na época, a luz parecia ser exclusivamente corpuscular. Esta diferença não se ajustava ao fato de a luz e a matéria serem formas de energia que poderiam transformar-se uma coisa na outra, e que ambas eram governadas pelas simetrias do espaço-tempo da relatividade. De Broglie começou, então, a pensar que talvez a matéria também tivesse um caráter duplo e que partículas, como elétrons, poderiam ter propriedades ondulatórias (HALLYDAY et al.,1995).

Os fótons não têm apenas energia, mas também momento linear. A expressão que relaciona o momento e a energia do fóton é dada pela seguinte equação, abaixo explicitada:

$$E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2. \quad (3)$$

Essa expressão dá a relação relativista entre o momento p e a energia total E de uma partícula, como um elétron ou um próton de massa m . Podemos aplicar a equação (3) a um fóton fazendo $E = hf$ e $m = 0$, pois um fóton, propagando-se com a velocidade da luz tem que ter massa nula. A equação (3) torna-se então $hf = pc$; isolando p , temos $p = \frac{hf}{c}$ e, usando a relação $c = \lambda f$, chegamos a

$$p = \frac{h}{\lambda} \text{ (momento de um fóton),} \quad (4)$$

onde λ é o comprimento de onda da luz. Podemos calcular o comprimento de onda como sendo

$$\lambda = \frac{h}{p} \text{ (comprimento de onda de uma partícula).} \quad (5)$$

A equação (5) mostra o comprimento de onda de De Broglie, relacionado à constante de Planck h e à quantidade de movimento, conectando aos aspectos ondulatórios e corpusculares da luz (HALLYDAY et al.,1995). Os princípios de quantização de energia, propostos por Einstein e Planck e as observações experimentais do espectro atômico dos elementos mostravam que as leis de Newton (as leis da mecânica clássica) não produziam resultado

satisfatório, quando aplicadas a sistemas muito pequenos como os átomos e as moléculas. Para explicar o movimento dos elétrons em torno do núcleo de um átomo, foi desenvolvida uma nova teoria com contribuições de Planck, Böhr, Einstein e Schrödinger, que é a Mecânica Quântica.

A noção ondulatória de partícula permitiu ao físico australiano Erwin Schrödinger desenvolver uma equação, chamada de equação de onda, para descrever as propriedades ondulatórias da partícula e, mais particularmente, o comportamento do elétron ligado ao átomo de hidrogênio. Essa equação apresentou uma solução discreta. Tal solução é expressa matematicamente, em que parâmetros representam números quânticos, ou seja, números inteiros introduzidos na física das partículas para exprimir grandezas de certas características delas e de seus sistemas. As soluções da equação de Schrödinger indicaram assim que dois elétrons não podem ocupar o mesmo estado energético. Esta regra já havia sido estabelecida empiricamente pelo físico suíço Wolfgang Pauli, em 1925, que a chamou de “O princípio de exclusão” (MOURÃO, 2005).

2.6 Uma breve história de De Broglie: O príncipe Louis de Broglie

No dia 15 de agosto 1892, nasceu o físico francês e príncipe Louis Victor Pierre Raymond de Broglie, membro de uma família de origem italiana, mas que estava a serviço dos reis da França desde o século XVII. Os Broglia (pronuncia-se *Brólhia*), seus mais distantes antepassados conhecidos da Idade Média, eram guerreiros e estadistas do Piemonte, uma região do norte da Itália. Ainda nesse mesmo século, alguns membros da família passaram a guerrear pela França e mudaram seu nome para Broglie – um nome pronunciado semelhantemente como *Brrói* (SÉRGIO e ANDRADE, 2007). Um dos marechais da família, François Marie de Broglie (1671-1745) casou-se com Thérèse de Granville, da família de ricos construtores de navios, e tornou-se, então, senhor de vastos domínios na Normandia, incluindo o castelo de Chambrais, perto de Bernay. Em 1742, o rei lhe concedeu o título hereditário de duque e suas terras passaram a ser o ducado de Broglie. O quarto marechal da família, Victor François de Broglie (1718-1804) destacou-se na Guerra dos Sete Anos e impediu a invasão atraída pelo duque de Brunswick em 1792. Recebeu como recompensa do rei Francisco I da Áustria, o título de Príncipe do Sacro Império Romano Germânico. Esse título passou a ser aplicado a todos os descendentes em linha direta (homens ou mulheres) do duque de Broglie. Portanto, os príncipes da família de Broglie não eram descendentes de rei, nem possuíam qualquer direito a um trono (SÉRGIO e ANDRADE, 2007).

2.7 Um pouco mais sobre a Hipótese de Louis de Broglie

Considerando que a luz demonstrava ter propriedades ondulatórias e corpusculares, seria natural questionar se a matéria (p.ex., os elétrons e os prótons) também apresentava tais características. Em 1924, enquanto estudante francês de física, Louis de Broglie, sugeriu essa ideia em sua tese de doutorado. O trabalho de De Broglie foi especulativo, visto que não foi comprovado e que, naquele tempo, ainda não havia evidências sobre o caráter ondulatório da matéria (TIPLER e MOSCA, 2006).

De Broglie utilizou a relação para o comprimento de onda relativo ao elétron, da seguinte maneira:

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (6),$$

onde p é o momento do elétron. Para a frequência das ondas do elétron, de Broglie escolheu a equação de Einstein que relaciona a frequência com a energia de um fóton.

$$f = \frac{E}{h} \quad (7),$$

Recomenda-se que essas equações (6) e (7) podem ser aplicadas a toda matéria. Para corpos macroscópicos, os comprimentos de onda calculados através da equação (6) são tão pequenos que se torna impossível observar as propriedades ondulatórias habituais de interferência ou difração. Até mesmo uma partícula de poeira, com massa de apenas de $1\mu\text{g}$ (micrograma), tem massa muito grande para apresentar qualquer característica ondulatória (TIPLER e MOSCA, 2006).

Nessa perspectiva quântica, as descrições dos fenômenos atômicos passaram a ser vistos com os olhares voltados para a natureza em termos de probabilidade, e nunca em termos de certeza.

2.8 O Princípio da Incerteza de Werner Heisenberg

Segundo a mecânica newtoniana, conhecendo-se a posição e a velocidade iniciais e os sistemas de forças que atuam num determinado ponto material, pode-se determinar em instantes posteriores sua posição e sua velocidade. O mesmo não acontece no universo atômico (elétrons e fótons). Em 1927, analisando as equações de sua mecânica de matrizes, Werner Heisenberg (1901 a 1976) descobriu a *indeterminação (incerteza)* associada à posição e à velocidade do elétron no interior do átomo: “Quanto maior a precisão na determinação da posição do elétron, menor é a precisão na determinação de sua velocidade ou sua quantidade de movimento e vice-versa” (RAMALHO et al., 2003). Quanto menor for o comprimento de onda do fóton incidente, mais precisamente localizamos o elétron, pois suas dimensões são extremamente pequenas. Menor comprimento de onda significa maior frequência e, portanto mais energia terá o fóton. Maior energia implica maior desvio e maior incerteza na velocidade. (RAMALHO et al., 2003).

Em 1928, Heisenberg e Böhr desenvolveram “a interpretação de Copenhague”, na qual reuniram a formulação matricial e a mecânica ondulatória em uma única teoria. A interpretação de Copenhague foi associada ao princípio de complementaridade de Böhr, que diz ser a natureza da matéria e energia dual e que o aspecto ondulatório e o corpuscular não são contraditórios, mas complementares. Portanto, a natureza compreende uma dualidade fundamental e os observadores devem escolher um ou outro aspecto para fazer as suas observações. A interpretação era também baseada nas relações de Incerteza de Heisenberg, que estabelecem que determinadas propriedades básicas de um objeto, como a posição e o momento de uma partícula subatômica, não poderiam ser determinados simultaneamente com exatidão (MOURÃO, 2005). Essas medidas não podem ser realizadas não porque sejamos impedidos por dificuldades práticas da medição, pois estamos admitindo dispor de instrumentos de medidas ideais, e tampouco que o elétron não tenha uma posição e um momento exatamente precisos, mas a natureza não nos permite determiná-los simultaneamente. Pois estamos tratando com uma limitação fundamental do conceito de “partícula” (HALLIDAY et al., 1995).

O Princípio da Incerteza de Heisenberg proporciona a medida quantitativa desta limitação. Na tentativa de medir, simultaneamente, a posição e o momento de um elétron que se move sobre o eixo dos x. Seja Δx a incerteza na medida da posição e Δp_x a incerteza na medida do seu momento. O Princípio da Incerteza afirma que

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h / 4\pi \text{ (Princípio da Incerteza).} \quad (8)$$

Então, se você projetar uma experiência para determinar precisamente a posição de um elétron (fazendo o seu deslocamento Δx muito pequeno), não poderá medir simultaneamente o seu momento com grande exatidão (Δp_x momento ficará maior). Se você alterar a experiência, de modo a melhorar a exatidão do momento a posição se deteriorará. Não há nada a fazer nesta questão. O produto das duas incertezas permanece fixo e este valor fixo nada mais é do que a constante de Planck. (HALLIDAY et al,1995).

Dessa forma, na Física quântica, ao contrário do que ocorre na Física clássica, a posição de uma partícula num certo instante não fica determinada. O que pode ser calculado é a probabilidade de encontrá-la numa determinada região do espaço. Essa é à base do Princípio da Incerteza, ou Princípio da Indeterminação, que é um dos fundamentos da Mecânica Quântica e foi descoberto em 1927 por Werner Heisenberg. Entretanto, Albert Einstein (1879-1955) não aceitou o Princípio da Incerteza proposto por Heisenberg.

Einstein estava determinado para encontrar uma descrição completa, causal e determinista da natureza. Em um debate iniciado por Böhr durante as conferências de Solvay, em 1927 e em 1930, que durou até o fim de sua vida, Einstein levantou uma série de objeções a respeito da Mecânica Quântica, tentando desenvolver experiências de pensamento por intermédio das quais a Incerteza de Heisenberg poderia ser violada.

No entanto, Böhr encontrou falha no raciocínio apresentado por Einstein. Em 1930, Einstein argumentou que a Mecânica Quântica como um todo era inadequada como uma teoria final do Universo (MOURÃO, 2005).

Segundo Einstein: “Deus não joga dados” era a forma cáustica de Einstein declarar que nunca pôde aceitar o abandono do determinismo e da causalidade clássicas, nem que o nosso conhecimento físico dependa da especificação de como esse conhecimento é adquirido, como as experiências são montadas. (PAIS, 1997). O que Einstein queria dizer em “Deus não joga dados?” Na sua concepção, se considerarmos a colisão de duas partículas, a teoria da mecânica pré-quântica, chamada de clássica, reivindica que, dadas as posições iniciais e de velocidade das partículas, é possível prever suas posições e velocidades, em qualquer momento posterior, para qualquer colisão individual. No entanto, diz a Mecânica Quântica, segundo o físico Max Born (1882 a 1970):

Obtém-se resposta, não para a pergunta “qual é o estado após a colisão”, mas sim para “o quanto é provável um dado efeito da colisão [...] Aqui surge todo o problema do determinismo. Do ponto de vista da Mecânica Quântica, não existe uma quantidade que num caso individual determine o efeito de uma colisão [...] os movimentos das partículas seguem leis probabilísticas (PAIS, 1997, p.153).

Em outras palavras, a probabilidade, que é um conceito utilizado nos cálculos das chances conforme a teoria dos processos estocásticos torna-se parte integrante da descrição do mundo físico. Einstein expressou sua opinião discordando de Born como seguinte frase: “A Física é uma tentativa de compreender a realidade como ela é, e, portanto, esta realidade independe da maneira como ela é observada” (PAIS, 1995).

Nessa perspectiva, considerando que os fenômenos quânticos estão num nível de Realidade diferente dos fenômenos clássicos descritos pela mecânica newtoniana, é importante discutir o conceito de nível de Realidade a partir de uma nova visão de mundo: a *Transdisciplinaridade*.

3 TRANSDISCIPLINARIDADE E SEUS PILARES

A Complexidade não é um conceito teórico e sim um fato da vida (MARIOTTI, 2002)

A Transdisciplinaridade apresenta dificuldade em ser aceita, pois, para uma sociedade que está pautada em modelos fragmentáveis, em causa-efeito e na lógica Aristotélica, compreender, aceitar e vivenciar a diferença, a aleatoriedade, a visão global das coisas não é fácil. Diante desta realidade, faz-se necessário investigar como e onde surgiu o termo “Transdisciplinar” na busca de encontrar fatos históricos que possibilitem uma maior compreensão sobre tal pensamento.

3.1 O surgimento do termo Transdisciplinaridade

O termo Transdisciplinaridade aparece pela primeira vez no Seminário de Nice na França, o I Seminário Internacional sobre Pluridisciplinaridade e a Interdisciplinaridade, realizado na Universidade de Nice de 7 a 12 de setembro de 1970, organizado pelo Centro para a Pesquisa e a Inovação do Ensino (CERI), patrocinado pelo Ministério da Educação Francês e pela Organização para a Cooperação e o Desenvolvimento Econômico (OCDE) (KLEIN apud SOMMERMAN, 2006).

Como participante desse seminário, Nicolescu relatou que, embora houvesse vários participantes que fizeram uso da palavra “Transdisciplinaridade” em suas comunicações, “Guy Michaud” e “André Lichnerowicz”, dois dos organizadores do Encontro lhe confirmaram, verbalmente, que foi Piaget o criador da palavra, pedindo aos outros participantes para pensarem sobre seu significado (NICOLESCU apud SOMMERMAN, 2006).

A primeira definição de Transdisciplinaridade foi dada por Piaget na comunicação nessa conferência.

[...] à etapa das relações interdisciplinares, podemos esperar ver sucedê-la uma etapa superior que seria ‘Transdisciplinar’, que não se contentaria em encontrar interações ou reciprocidades entre pesquisas especializadas, mas situaria essas ligações no interior de um sistema total, sem fronteira estável entre essas disciplinas (NICOLESCU apud SOMMERMAN, 2006, p. 44).

E essa definição serviu de base para a que foi adotada pela Conferência conforme Klein apud Sommerman (2006):

Alguns participantes quiseram que “Transdisciplinar” estivesse no título da Conferência. Os organizadores foram da opinião de “pluridisciplinaridade” conotando justaposição de disciplinas, e “interdisciplinaridade”, conotando integração de conceitos e métodos, acomodavam a diversidade de sistemas educacionais existentes no mundo. No entanto, a conferência adotou uma definição básica de Transdisciplinaridade: “estabelecendo um sistema comum de axiomas para um conjunto de teorias” (SOMMERMAN, 2006, p. 44).

Nessa mesma conferência, três dos participantes desenvolveram primeiramente o conceito, revelando dois focos de interesse. Jean Piaget e André Lichnerowicz colocaram o foco nas disciplinas internas da Ciência, enquanto Erich Jantsch enfatizou objetivos externos (SOMMERMAN, 2006).

Tanto Piaget como Lichnerowicz, consideraram que a Transdisciplinaridade poderia fornecer um quadro conceitual que atravessaria as disciplinas. O psicólogo Piaget estava interessado nas interações e acreditava que o amadurecimento da compreensão das estruturas gerais e dos padrões do pensamento conduziria a uma teoria geral das estruturas e dos sistemas. Se Piaget e Lichnerowicz colocaram o objeto de estudo de suas reflexões Transdisciplinares nas interações entre as Ciências, Erich Jantsch o colocou nas interações com o ser humano e social. Jantsch, do mesmo modo que Piaget considerou a inter e a Transdisciplinaridade “como princípios organizacionais”, porém, seu modelo incluía não só o sistema da Ciência (de todas as disciplinas e interdisciplinas), mas também o “da educação e o da inovação”, alcançando não só o “nível empírico, pragmático e normativo”, como também os níveis propositivos (SOMMERMAN, 2006).

3.2 A definição de Transdisciplinaridade e os congressos internacionais

É importante citar as contribuições que cada um desses eventos destinou para a promoção da Transdisciplinaridade e para seu esclarecimento conceitual.

O colóquio “A Ciência Diante das Fronteiras do Conhecimento”, organizado pela UNESCO em Veneza, com apoio da Fundação Giorgio Cini, de 3 a 7 de março de 1986, deu início à elaboração de um documento final, intitulado *Declaração de Veneza*, assinado por 19 personalidades no campo da Ciência e da arte de diversos países, incluindo dois ganhadores do Prêmio Nobel. A passagem que promove a explicitação da Transdisciplinaridade:

Em nossa opinião, a amplitude dos desafios contemporâneos exige, por um lado, a informação rigorosa e permanente da opinião pública e, por outro, a criação de organismo de orientação e até de decisão de natureza pluridisciplinar e Transdisciplinar. Expressamos a esperança de que a UNESCO dê prosseguimento a esta iniciativa, estimulando uma reflexão dirigida para a universidade e a Transdisciplinaridade (SOMMERMAN, 2006, p.47).

O Congresso Ciências e Tradição: Perspectivas Transdisciplinares para o século XXI, organizado pela UNESCO, em Paris, de 2 a 6 de dezembro de 1991, gerou um documento intitulado *Ciências e Tradição*. Este documento foi usado como fundamento para conceituar a Transdisciplinaridade e seus métodos e serviu de base para elaboração de documentos posteriores.

O I Congresso Mundial de Transdisciplinaridade, organizado pelo Centro Internacional de Pesquisa e Estudos Transdisciplinares (CIRET), realizado no Convento de Arrábida, Portugal, de 2 a 6 de novembro de 1994, produziu um documento intitulado de *Carta da Transdisciplinaridade* (Anexo A) que foi assinado por 62 participantes de 14 países. Essa Carta é constituída por 14 artigos, que permitiram avançar ainda mais sobre a definição e a metodologia transdisciplinar (SOMMERMAN, 2006).

O Congresso Mundial da Transdisciplinaridade deu um passo muito importante em seu documento final: *Síntese do Congresso de Locarno*. Nesse Congresso, definiram-se os três pilares metodológicos da pesquisa Transdisciplinar e os sete eixos básicos da sua aplicação na educação: 1º) a Complexidade; 2º) a Lógica do Terceiro Incluído e 3º) os Diferentes Níveis de Realidade. Os sete eixos básicos da evolução Transdisciplinar na educação foram: 1º) a educação intercultural e transcultural; 2º) o diálogo entre arte e ciência; 3º) a educação inter-religiosa e transreligiosa; 4º) a integração da revolução informática na educação; 5º) a educação transpolítica; 6º) a educação Transdisciplinar; 7º) a relação Transdisciplinar: os educadores, os educandos e as instituições e a sua metodologia subjacente.

O II Congresso Mundial da Transdisciplinaridade foi realizado em Vila Velha/Vitória do Espírito Santo, Brasil, de 06 a 12 de setembro de 2005, no qual foram referendados os pilares metodológicos da pesquisa transdisciplinar e os seus sete eixos básicos de sua aplicação na educação.

3.3 Os três pilares da metodologia da pesquisa Transdisciplinar

É importante definir, de maneira objetiva, esses três pilares da Transdisciplinaridade, pois com eles surgem a epistemologia e a metodologia da pesquisa Transdisciplinar, que são importantes para esta pesquisa.

Necessário é compreender a lógica que permeia a sociedade atual, ainda baseada em um pensamento simplificador, fragmentador e excludente: o pensamento linear. Porém, é mais do que observável que o ser humano, por ser complexo, precisa de muito mais do que uma compreensão e condição limitada de mundo. A cada dia, a sociedade passa por mudanças significativas, as novas tecnologias e a evolução das Ciências abrem as portas para um mundo novo, que, para ser compreendido, é mister uma nova visão da realidade.

Uma visão limitada do mundo, do real, dá-nos condições apenas de viver situações limitadas, mecânicas, fragmentadas, corriqueiras. Porém, ao nos depararmos com algo mais complexo, algo que precise ser compreendido de maneira global, não temos competências para a sua resolução, porque precisaríamos estar inseridos nessa mesma linha de pensamento e não condicionados à exclusão, a respostas imediatas: sim ou não, isso ou aquilo e à causalidade simples.

O pensamento linear repousa na relação binária sim/não, e não é necessário mais que isso para se inserir, de maneira eficaz, nesse mundo que foi construído. Porém, é preciso deixar claro que, como nos diz Mariotti (2002, p.46):

O nosso cérebro está naturalmente preparado para o pensamento complexo, ou seja, os nossos neurônios funcionam não apenas em termos da binariedade zero/um, sim/não, mas estão também preparados para lidar com situações complexas, nas quais é preciso pensar em termos de “talvez” ou “se?”.

O mundo anseia por transformações, por uma ampliação de nossas mentes e de visão. O homem, para ser completo, necessita reconstruir o mundo e viver a plenitude de sua existência. É preciso unir as partes e o todo e o pensamento complexo é o caminho para essa comunhão, pois, segundo Morin (2003, p.44):

Pode-se dizer que o que é complexo recupera, por um lado, um mundo empírico, a incerteza, a capacidade de atingir a certeza, de formular uma lei eterna, de conceber uma ordem absoluta. Por outro lado, recupera alguma coisa que diz respeito à lógica, ou seja, à incapacidade de evitar contradições.

É preciso, então, uma nova atitude em relação ao mundo e à vida. Essa mudança de atitude e de visão de mundo requer a união e a integração dos modos linear e sistêmico de compreender, viver, perceber e pensar o mundo, ou seja, que esteja voltada para o pensamento complexo: a Transdisciplinaridade, que resgata a grande teia do conhecimento, um conhecimento que impõe rupturas de saberes que nos estão arraigadas e que, dificilmente, é passível de mudança.

É importante ressaltar que o conhecimento foi fragmentado dentro de uma lógica Aristotélica, e como disciplinas estão divididas em áreas.

3.4 Definições de Multidisciplinar, Pluridisciplinar, Interdisciplinar e Transdisciplinaridade

A disciplinaridade, a pluridisciplinaridade, a interdisciplinaridade e a Transdisciplinaridade são definidas por Nicolescu (2005, p.52-54), como segue:

- *Disciplinaridade* - diz respeito ao estudo de um objeto por uma única disciplina. É importante observar a disciplinaridade que trata o objeto em estudo num único e mesmo nível de Realidade;
- *Pluridisciplinaridade* - diz respeito ao estudo de um objeto de uma disciplina por várias disciplinas ao mesmo tempo. Exemplo de um quadro de Giotto pode ser estudado pela ótica da história da arte, em conjunto com a da física, da química, da história das religiões, da história da Europa e da Geometria. Com isso, o objeto sairá assim enriquecido pelo cruzamento de várias disciplinas;
- *Interdisciplinaridade* - diz respeito à transferência de métodos de uma disciplina para outra. Podemos distinguir três graus de interdisciplinaridade: a) *um grau de aplicação*. Por exemplo, os métodos da física nuclear transferidos para a medicina levam ao aparecimento de novos tratamentos para o câncer. b) *um grau epistemológico*. Por exemplo, a transferência de métodos da lógica formal para o campo do direito produz análises interessantes na epistemologia do direito; c) *um grau de geração de novas disciplinas*. Por exemplo, a transferência de métodos da matemática para o campo da física gerou a física-matemática; os da física de partículas para a astrofísica, a cosmologia quântica; os da matemática para os fenômenos meteorológicos ou para os da bolsa, a teoria do caos, os da informática para a arte; a arte para a informática.
- *Transdisciplinaridade*, como o prefixo ‘trans’ indica - diz respeito àquilo que está ao mesmo tempo entre as disciplinas, através das diferentes disciplinas e além de qualquer disciplina. Seu objetivo é a compreensão do mundo presente, para o qual um dos imperativos é a unidade do conhecimento.

Uma das grandes barreiras para a Transdisciplinaridade é a quebra da lógica Aristotélica, que é uma lógica do terceiro excluído (isso ou aquilo) e abre as portas para a lógica do terceiro incluído (isso e aquilo). É difícil aceitar, por exemplo, que passamos todo esse tempo

pensando que só existem duas opções para o “ser” das coisas: “ou elas são isso, ou são aquilo”, “ou uma coisa ou outra”. Incrivelmente, a lógica do terceiro incluído nos mostra que é possível ser “uma coisa e outra também”. Assim, os três pilares da Transdisciplinaridade são os níveis de Realidade, a lógica do terceiro incluído e a complexidade (NICOLESCU, 2005). Essa visão Transdisciplinar, respaldada na lógica do terceiro incluído, facilita a abordagem da Mecânica Quântica, pois compreende o Princípio da Dualidade da Luz, que tem uma natureza dicotômica: ora se comportando como uma onda, e ora se comportando como uma partícula, pois na medida em que ela é vista como um quantum é, ao mesmo tempo, corpúsculo e onda.

A lógica Aristotélica, tão utilizada no nosso cotidiano, não conseguiria entender ou explicar esse Princípio de Dualidade, pois se respalda na exclusão, na lógica binária e, por essa lógica, a luz como um trem de onda e o fenômeno da difração da luz são incompatíveis com o fóton de luz. Assim como as leis da mecânica newtoniana também não pode descrever simultaneamente a posição e o momentum do elétron, pois não são adequadas para descrever este nível de Realidade da matéria.

Para responder a tais indagações, surgiu o conflito com o qual Max Planck se deparou no início do século XX, ao perceber que a energia não pode ser algo contínuo e sim, descontínua, permitindo a formulação da quantização da energia. Tal conflito de descontinuidade que aparece no universo quântico, manifesta-se também na estrutura dos diferentes níveis de Realidade.

3.5 A lógica do terceiro incluído e os diferentes níveis de Realidade

O desenvolvimento da Física quântica possibilitou uma interação entre o mundo quântico e o mundo macrofísico, tornando o plano da teoria e da experiência científica, ao aparecimento de pares de contraditórios mutuamente exclusivos (A e não A): onda e corpúsculo, continuidade e descontinuidade, separabilidade e não separabilidade, causalidade local e causalidade global, simetria e quebra de simetria, reversibilidade e irreversibilidade do tempo, etc (NICOLESCU, 2005, p.33).

Segundo Nicolescu (2005), as equações da Física quântica submetem-se a um grupo de simetrias, mas suas soluções quebram essas simetrias. Da mesma maneira, supõe-se que um grupo de simetria descreva a unificação de todas as interações físicas conhecidas, mas esta simetria deve ser quebrada para poder descrever a diferença entre as interações forte, fraca, eletromagnética e gravitacional, como descrito na Física Nuclear.

O problema da investigação da linha do tempo sempre fascinou a curiosidade humana. O nosso nível macrofísico caracteriza-se pela irreversibilidade do tempo. Caminhando do nascimento para a morte, da juventude para a velhice. O inverso não é possível. A linha do tempo está associada à entropia, ao crescimento da desordem. Por outro lado, o nível microfísico caracteriza-se pela invariância temporal (reversibilidade do tempo). No mundo microfísico, existem alguns processos que não permitem esta invariância temporal. As exceções estão intimamente ligadas ao nascimento do universo, mais precisamente à predominância da matéria sobre a antimatéria. O universo é feito de matéria e não de antimatéria, graças a esta pequena violação da invariância temporal (NICOLESCU, 2005).

A Mecânica Quântica não pôde ser substituída por uma teoria mais predizível. Devemo-nos habituar à coexistência paradoxal da reversibilidade e da irreversibilidade do tempo, um dos aspectos do tempo, um dos aspectos da existência de diferentes níveis de Realidade (idem, 2005).

Segundo Nicolescu (2005, p. 35-36), o escândalo intelectual provocado pela Mecânica Quântica consiste no fato de que os pares de contraditórios que ela coloca em evidência são de fato mutuamente opostos quando analisados através da lógica clássica. Esta baseia-se em três axiomas:

1. o axioma da identidade: $A \text{ é } A$;
2. o axioma da não-contradição: $A \text{ não é não } A$;
3. o axioma do terceiro excluído: não existe um terceiro termo T (T de 'terceiro incluído') que é ao mesmo tempo A e não A .

Na hipótese da existência de um único nível de Realidade, o segundo e o terceiro axiomas são, evidentemente, equivalentes. Isto talvez explique porque, mesmo nos manuais de lógica, o axioma do terceiro excluído só é raramente mencionado, enquanto axioma, independente daqueles da identidade e da não contradição.

Se nos apropriarmos da lógica clássica, chegamos, imediatamente, à conclusão de que os pares de contraditórios, colocados em evidência pela Física quântica, são mutuamente excluídos, pois não podemos afirmar, ao mesmo tempo, a validade de uma coisa e seu contrário: A e não A . “A perplexidade provocada por essa situação é bem compreensível: podemos afirmar, se estivermos em nosso juízo perfeito, que a noite é o dia, o preto é o branco, o homem é a mulher, a vida é a morte” (NICOLESCU, 2005, p.36)?

Conforme Nicolescu (2005), o surgimento da Mecânica Quântica em 1930, graças aos fundadores dessa nova Ciência, como: Planck, Böhr, Einstein, Pauli, Heisenberg, Dirac,

Schrödinger, Born, De Broglie e outros, colocaram, com propriedade, a necessidade de uma nova lógica, chamada por eles de ‘quântica’.

O surgimento dessas novas lógicas era para resolver os paradoxos mal resolvidos pela Mecânica Quântica e tentar, na medida do possível, chegar a uma lógica que pudesse se adequar aos princípios quânticos.

No sistema Aristotélico, A é igual a A. Tudo o que não for A é descartado (lógica do terceiro excluído). A não pode ser igual a B, nem a mais nada. Só há duas alternativas: ou sim ou não. A noção de “talvez” é incompatível com esse modelo mental. Utilizamos a lógica Aristotélica a todo o momento em nosso cotidiano e isso é bom, porque, sem ela, não poderíamos conduzir nosso dia a dia. O que não é lógico, porém, é imaginar que este seja o único processo mental útil à vida (MARIOTTI, 2002).

Segundo Nicolescu (2005), a maioria das lógicas quânticas modificou o segundo axioma da lógica clássica – o axioma da não contradição –, nele, introduzindo a não contradição com vários valores de verdade no lugar do par binário (A, não A).

O físico Lupasco recebeu o mérito de ter mostrado que a lógica do terceiro incluído é uma verdadeira lógica, formalizável e formalizada, multivalente (com três valores: A, não A e T) e não contraditória. A ausência da noção de ‘níveis de Realidade’, em sua filosofia, obscurecia seu conteúdo. Acreditava-se que a lógica de Lupasco violava o princípio da não contradição, de onde o nome, um tanto infeliz, de ‘lógica da contradição’ comportava o perigo de escorregar semanticamente. Além disso, o receio de introduzir a ideia de ‘terceiro incluído’ fez com que aumentasse a desconfiança em relação a tal lógica.

De acordo com Nicolescu (2005), a compreensão do axioma do terceiro incluído – há um terceiro termo T que é, ao mesmo tempo, A e não A – desta forma, fica compreensível quando a noção de ‘níveis de Realidade’ é introduzida. Se permanecermos em único nível de Realidade, toda manifestação aparecerá como uma guerra entre dois elementos contraditórios (ex.: onda A e corpúsculo não A). O terceiro dinamismo, o estado T, é exercido em outro nível de Realidade, quando surge como desunido (onda ou corpúsculo) está, de fato, unido (quantum) e o que parece contraditório é percebido como não contraditório.

É a projeção de T sobre um único e mesmo nível de Realidade que produz a aparência de pares antagônicos, mutuamente exclusivos (A e não A). Um único e mesmo nível de Realidade não pode produzir senão oposições antagônicas. Ele é, por sua própria natureza, autodestruidor, se for completamente separado de todos os outros níveis de Realidade. Um terceiro termo, digamos T', que está localizado no mesmo nível de Realidade que os opostos A e não A, não pode realizar sua conciliação (NICOLESCU, 2005).

De acordo com Nicolescu (2005), na lógica do terceiro incluído, os opostos são antes contraditórios: a tensão entre os contraditórios constrói uma unidade maior que os inclui. Percebemos a confusão entre o axioma de terceiro excluído e o axioma de não-contraditório.

A lógica do terceiro incluído é não contraditória, no sentido de que o axioma da não contradição é perfeitamente respeitado, com a condição de que as noções de “verdadeiro” e “falso” sejam alargadas, de tal modo que as regras de implicação lógica digam respeito não mais a dois termos (A e não A), mas a três termos (A, não A e T), coexistindo no mesmo momento do tempo (idem, 2005 p.40).

É uma lógica formal, da mesma forma que qualquer outra lógica formal: suas regras traduzem-se por um formalismo matemático relativamente coerente (NICOLESCU, 2005).

Tal lógica é uma lógica da complexidade e até, talvez, sua lógica seja privilegiada, na medida em que possibilite atravessar, de forma coerente, os diferentes domínios do conhecimento.

A lógica do terceiro incluído não elimina a lógica do terceiro excluído: ela apenas limita seu domínio de validade. A lógica do terceiro excluído é, certamente, validada por situações relativamente simples como, por exemplo, a circulação de automóveis em uma estrada: ninguém pensa em introduzir, em uma estrada, um terceiro sentido em relação ao sentido permitido e ao sentido proibido.

Por outro lado, a lógica do terceiro excluído é prejudicial nos casos complexos como, por exemplo, no domínio social ou político. Ela age, nesses casos, como uma verdadeira lógica de exclusão: o bem ou o mal, a direita ou a esquerda, as mulheres ou os homens, os ricos ou os pobres, os brancos ou os negros (BADESCU, 2001, p.126-127).

Um recorte social da lógica do terceiro excluído, nos grandes centros urbanos. Nos cruzamentos de trânsito das grandes cidades, por exemplo, se estamos convencidos de que

todo menino de rua é drogado e ladrão, o que se aproxima do nosso carro com a mão estendida também o será. Sabemos que há exceções, mas o preconceito, alimentado pela linearidade, é mais forte que a tolerância. Afinal, aprendemos na escola que A só pode ser igual a A e o resto fica excluído – inclusive os meninos de rua, que, no limite, acabam se tornando ladrões de fato, porque a lógica da exclusão impede que a sociedade tome providências para evitar essa realidade (MARIOTTI, 2002).

Para compreender a lógica do terceiro excluído e a lógica do terceiro incluído, que naturalmente estão envolvidas numa realidade entre o macrofísico e o microfísico, é importante entender os níveis de Realidade, na qual eles estão envolvidos.

Os níveis de Realidade são totalmente diferentes dos níveis de organização, apresentados em abordagens sistêmicas (sistemas naturais). “Os vários níveis de organização pertencem a um único e mesmo nível de Realidade, em suas estruturações e leis fundamentais” (NICOLESCU, 2005, p.32). O aparecimento de dois níveis de Realidade diferentes na abordagem dos sistemas naturais é um fato importante na realização da história do conhecimento. Ele permite repensar o nosso papel como cidadão e resgatar uma nova leitura dos conhecimentos passados, enquanto indivíduo.

Para tanto, o surgimento dos diferentes níveis de Realidade e das novas lógicas, (entre elas a do terceiro incluído) no estudo de sistemas naturais, um terceiro fator é inserido para ajudar a compreender a visão clássica de mundo: a complexidade.

3.6 A Complexidade

Segundo Tronca (2006), a palavra complexidade pode ser entendida como um tecido *complexus*, é tecido junto de forma inseparável. Pode também ser entendida de forma mais ampla, como sendo um tecido de acontecimentos, ações, interações, determinações, acasos, que constituem os fenômenos do mundo. A princípio, parece que complexidade supõe confusão, desordem e incerteza. Colocar ordem nos fenômenos parece ser imprescindível para o conhecimento; isso significa retirar as ambiguidades e confusões. Porém, ao se retirar toda a ambiguidade, ocorre o risco de eliminar outras características do *complexus*.

De acordo com Mariotti (2002, p.87), “A complexidade não é um conceito teórico e sim um fato da vida”. Tal pensamento está relacionado à multiplicidade, ao entrelaçamento e à contínua interação de muitos sistemas e fenômenos que compõem o mundo natural.

Os sistemas complexos estão dentro de nós e a recíproca é verdadeira, faz-se necessário conhecê-los, para melhor poder conviver com eles (MARIOTTI, 2002). Tais sistemas permitem ter um pensamento aberto, abrangente e flexível, que é o pensamento complexo. Esse pensamento configura uma nova visão de mundo, que aceita e procura compreender as mudanças permanentes do real e não pretende negar a contradição à multiplicidade, à aleatoriedade e à incerteza, e sim, conviver com elas.

“A complexidade é o resultado natural da complementaridade entre a ordem e a desordem, e mostra que uma não se reduz à outra nem ambas se resolvem numa síntese, elas convivem como pólos antagônicos e mutuamente alimentadores” (MARIOTTI, 2002, p.88).

Segundo Mariotti (2002, p.88), os fenômenos complexos são melhores de ser compreendidos pelo pensamento complexo:

O pensamento linear é incapaz de entender a desordem pura, porque é pautado exclusivamente pela ordem. O pensamento sistêmico, por sua vez e dada a sua natureza, não pode compreender a ordem pura. [...] a complexidade não pode ser entendida por nenhum desses dois modelos mentais. Essa é a tarefa do pensamento complexo, que lida com a ordem, a desordem, a interação e a organização. Trata-se de um pensamento amplo.

Como ressalta Morin, os pontos e momentos nos quais não se pode superar as contradições, vencer os antagonismos, ou seja, ultrapassar os paradoxos, aí é que está a complexidade.

De acordo com Morin (2006), na Ciência, a complexidade surgiu sem ainda dizer seu nome, já no século XIX, aparece na microfísica e na macrofísica. A microfísica era atribuída não apenas numa relação complexa entre o observador e o observado, mas também numa noção mais do que complexa, desconcertante, da partícula elementar que se apresenta ao observador, ora como onda, ora como corpúsculo. Mas a microfísica era considerada caso limite, fronteira [...] e esquecíamos que essa fronteira conceitual dizia respeito, de fato, a todos os fenômenos materiais, aí compreendidos: os de nosso próprio corpo e os de nosso próprio cérebro.

A ideia de Descartes (1596-1658) que afirmava ser preciso separar para entender não é adequada para o entendimento dos sistemas complexos. No entanto, as disciplinas científicas desenvolveram-se com base nessa concepção de separação. A separação entre Ciência e cultura humanistas tornou-se uma realidade no século XX. A partir dessa aceitação, a separação entre o sujeito e o objeto observados tornou-se imprescindível (MORIN, 2006).

No século XX, o homem compreendeu que a Ciência não é o reino da certeza. A Ciência abraçou muitas certezas, mas não possuiu o domínio da certeza absoluta no plano teórico. A Ciência clássica está alicerçada na ordem, na separabilidade e na lógica Aristotélica. Contudo tais alicerces não são adequados para tratar os sistemas termodinâmicos que funcionam fora da condição de equilíbrio, como por exemplo, a manutenção dos gradientes eletroquímicos celulares, a manutenção da temperatura corporal e vários outros fenômenos relacionados com seres vivos, tampouco os problemas da microfísica, como o da dualidade da luz.

Desse modo, espera-se que a Transdisciplinaridade, com os seus três pilares: a complexidade, a lógica do terceiro incluído, e os diferentes níveis de Realidade, possa contribuir para a compreensão do Princípio da Dualidade da Luz.

4 A PSICOLOGIA DOS CONSTRUTOS PESSOAIS DE GEORGE KELLY

Segundo Kelly, as pessoas são ativas por definição, de modo que não precisamos explicar o “porquê” de elas serem ativas; elas são ativas porque estão vivas!

4.1 A teoria dos construtos pessoais de George Kelly

George Alexander Kelly nasceu no dia 28 de abril em 1905 numa fazenda em Perth, no estado norte-americano de Kansas, era filho único de um ministro Presbiteriano. Fez bacharelado em Física e Matemática em 1928 e tornou-se mestre em Sociologia Educacional em 1929, bacharel em 1930, após um ano, recebeu o título de PhD em Psicologia (CLONINGER, 1999).

Kelly recebe influência de Freud após as primeiras leituras, relatando que passou apenas nove meses estudando psicologia, antes de completar seu doutorado na Universidade de Iowa. Desta forma, ficou com liberdade para poder desenvolver uma teoria que fosse original, sem ligação com os teóricos anteriores, além de ainda ter lecionado durante cerca de doze anos, numa faculdade localizada na região oeste do Kansas. Embora tivesse se formado em psicologia da educação e não em psicologia clínica, atendia estudantes gratuitamente numa clínica de aconselhamento que ele fundou. Essa clínica tornou-se o laboratório de sua teoria. Nessa mesma época, trabalhou como psicólogo viajante em várias escolas rurais do Kansas, podendo ser reconhecido como psicólogo escolar (CLONINGER, 1999).

Sua maior contribuição à Psicologia foi a obra: *A Psicologia dos Construtos Pessoais* (1955), originalmente apresentada em dois volumes; porém, foi condensada em um único volume, em 1963 sob o título: *Uma teoria de Personalidade: a Teoria dos Construtos Pessoais* (CLONINGER, 1999).

Kelly propôs uma teoria da personalidade que enfatiza os pensamentos do indivíduo no que se diferencia das outras teorias existentes na época, por tratar-se da personalidade individual.

Para Kelly, as pessoas são motivadas por definição, de modo que não precisamos explicar o “porquê” de elas serem ativas; elas são ativas porque estão vivas! A motivação também é usada para explicar por que as pessoas agem de uma maneira e não de outra (HALL et al., 2000).

Sua teoria tem como base a construção ativa do conhecimento que George Kelly chamou de “Alternativismo Construtivo” (BASTOS, 1998). Segundo ele, todas as pessoas desenvolvem teorias pessoais para compreender a realidade e antecipar eventos e, por isso se assemelham aos cientistas. Para ele, também, o homem é melhor compreendido à luz da História e através do fluxo de eventos em que está inserido.

Nessa perspectiva, Kelly aproxima o homem do cientista e diz que cada “homem cientista” busca representar o mundo que o rodeia, tentando prever os eventos que sucederão em sua vida. Essa previsão é representada por meio de padrões, que Kelly chamou de *construtos* (CLONINGER, 1999).

De acordo com Cloninger (1999), o construto pode ser: “construto concreto”, aquele que não pode ser ampliado; “construto permeável”, aquele que pode ser ampliado para incluir novos elementos e “construto pessoal” em que a pessoa possui algo para prever acontecimentos.

Esses construtos se encontram estruturados em cada indivíduo de forma dicotômica e para que haja um construto é preciso uma comparação mínima de três elementos, em que dois deles se assemelham, sendo ao mesmo tempo opostos ao terceiro. Assim, para George Kelly, cada indivíduo possui um repertório único de construto, diferenciando-se por isso das outras pessoas. Por outro lado, mesmo havendo o aspecto único em cada um, ele também nos diz que existem construtos ou sistemas que são compartilhados e esta é a condição para que haja a comunicação entre as pessoas. Dessa maneira, pelos nossos repertórios de construtos nos diferenciamos dos outros e, ao mesmo tempo, também nos assemelhamos deles.

Segundo Kelly é possível usar o mesmo construto repetidamente ao considerar as pessoas ou aplicar vários construtos diferentes. A complexidade cognitiva de uma pessoa é refletida pelo número de construtos diferentes que ela usa (CLONINGER, 1999).

Para George Kelly, o progresso da humanidade se deu pela permanente tentativa do homem de querer controlar o fluxo de eventos em que está inserido, pois é cada homem que decide sua vida, sendo responsável por suas ideias e por suas respectivas mudanças e é ele quem decide como agir dentro de cada evento.

Diante dessas observações, George Kelly formula sua teoria: A teoria dos Construtos Pessoais, que apresenta um postulado fundamental e 11 corolários. O postulado fundamental nos fala que: “Os processos de uma pessoa são psicologicamente canalizados pelas maneiras nas quais ela antecipa os eventos” (CLONINGER, 1999, p.427).

Diante desse postulado, ele define construto como sendo “uma representação (sistema de construção) de parte do universo, que é testada frente à realidade desse universo” e diz que “O homem procura melhorar sua construção, aumentando seu repertório de construtos” (MOREIRA, 1999, p.126).

Desse modo, para que um indivíduo antecipe os eventos é preciso que existam construções pessoais (corolário da construção) e, para isso, constrói réplicas (CLONINGER, 1999). Para construir as réplicas, cada indivíduo observa características nesses eventos, tais características são os chamados *construtos*. Se dois ou mais eventos são antecipados ou construídos, usando alguns construtos iguais, esses eventos podem ser considerados semelhantes.

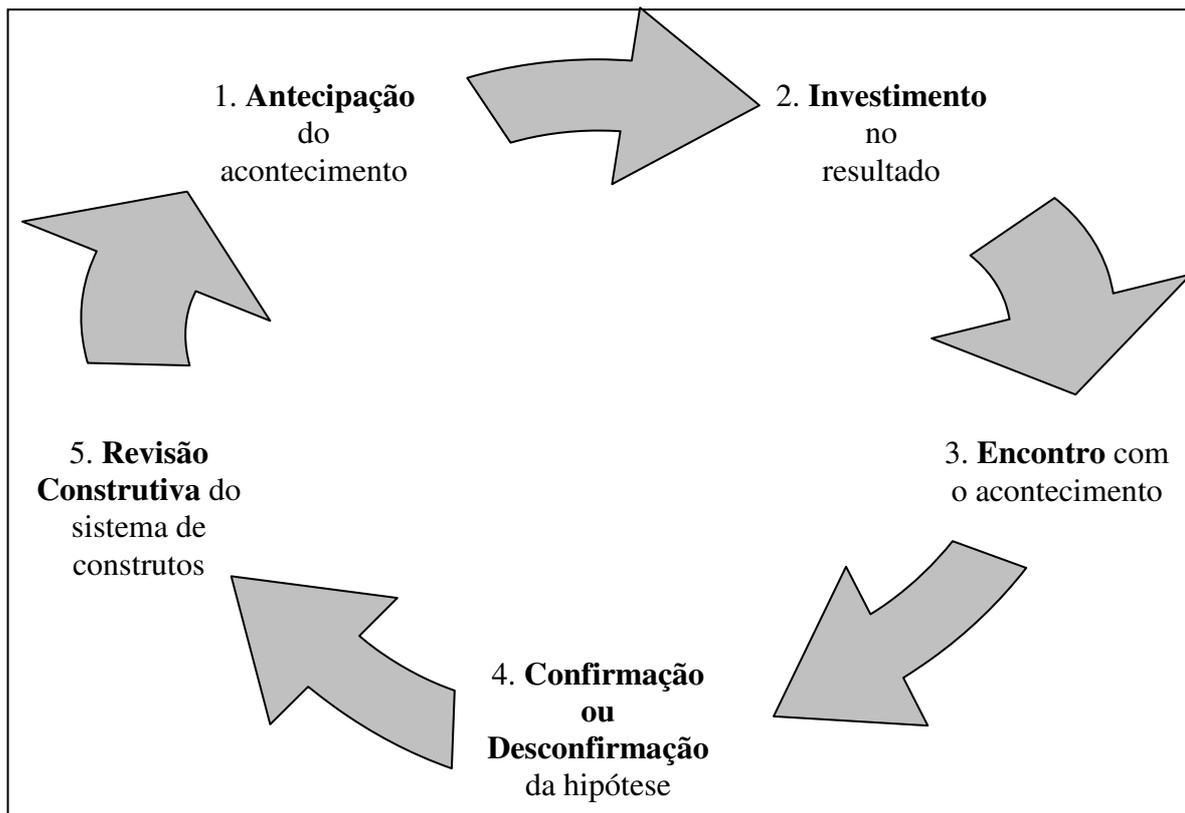
Ao mesmo tempo em que alguns eventos podem ser antecipados por alguns construtos iguais, muitos eventos são antecipados de maneira própria, por isso o sistema de construção de cada pessoa é único (corolário da individualidade), pois, quando duas ou mais pessoas observam o mesmo evento, podem ter visões totalmente diferentes (CLONINGER, 1999). Quando, por outro lado, duas ou mais pessoas vivenciam um evento e usam construções semelhantes na compreensão desse evento, pode-se dizer que essas pessoas são semelhantes quanto àquela experiência (corolário da comunalidade), isso implica dizer que pessoas diferentes podem construir experiências semelhantes, mesmo que possuam construtos diferentes (MOREIRA, 1999).

O segundo o corolário de Kelly referido por ele como o da escolha diz que cada pessoa escolhe a alternativa que lhe parece a melhor base para antecipar os eventos (CLONINGER, 1999), mas o corolário da dicotomia nos diz que o sistema de construção de uma pessoa é

composto de um número finito de construtos dicotômicos (CLONINGER, 1999) e essa escolha vai depender do repertório de construtos que a pessoa tenha e ainda, o corolário do intervalo acrescenta que um construto é conveniente apenas para a antecipação de um número limitado de eventos (CLONINGER, 1999).

Dessa forma, a experiência é indispensável na construção dos construtos, pois ele nos acrescenta que “à medida que as antecipações ou hipóteses de uma pessoa são sucessivamente revisadas, seu sistema de eventos se modifica. Reconstrói” (MOREIRA, 1999, p.133). Este corolário da experiência apresenta 5 etapas: **antecipação, investimento, encontro, confirmação ou desconfirmação e revisão construtiva**, reportando-nos à Educação, pois fica claro que a experiência não é algo que aconteça em apenas um momento, mas em um conjunto de etapas, podendo ser chamado Ciclo da Experiência.

FIGURA 1 - As cinco etapas do Ciclo da Experiência



Fonte: Cloninger (1999, p.428)

De acordo com Kelly, aprender da experiência por meio da *confirmação* ou *desconfirmação* de hipótese é, sem dúvida, o método do cientista (CLONINGER, 1999).

Assim, para que haja uma experiência (nos reportando ao processo de ensino-aprendizagem) será preciso que a pessoa esteja envolvida nessas diversas etapas, em que utiliza seus construtos e antecipa os eventos (*antecipação*); mais adiante, com sua capacidade de construir réplicas para aquele evento, ela faz investimentos acerca do evento e se prepara (*investimento*).

Em seguida, no *encontro*, quando se depara com o evento que antecipou e investiu, ela analisa suas teorias pessoais e a análise leva a uma *confirmação* ou *desconfirmação* do que previu para aquele evento (*confirmação* ou *desconfirmação*). Esta análise leva a pessoa a uma revisão acerca dos pontos que geraram conflito. A experiência, para Kelly, só é verdadeira, quando essa revisão traz mudanças na forma de pensar da pessoa. É importante ressaltar que, mesmo não sendo considerado como experiência, aquele evento irá deixar algo no indivíduo que, futuramente, poderá fazer com que ele entenda certos assuntos, até então não entendidos.

Porém, os construtos só podem ser modificados dentro de subsistemas de construção (corolário da modulação), dessa maneira, existe certo limite na mudança que cada experiência apresenta (CLONINGER, 1999).

Ainda se tratando da questão educacional em que a teoria de Kelly pode contribuir para melhor compreensão, temos dois corolários fundamentais: o corolário da organização e o da fragmentação. No corolário da organização, cada pessoa constrói, para sua conveniência, um sistema de relações ordinais entre os construtos (CLONINGER, 1999) e o corolário da fragmentação nos diz que uma pessoa pode empregar uma variedade de subsistemas de construção que são incompatíveis (CLONINGER, 1999).

Pelo entendimento dos corolários, percebemos como se dão as estratégias no processo da aprendizagem, em que cada pessoa vai organizando os conceitos de forma hierárquica e descartando, quando necessário, os construtos anteriores que não são mais compatíveis com o novo saber construído. É importante ressaltar aqui o corolário da sociabilidade, pois ele nos fala que uma pessoa pode ter um papel construtivo na relação com outra pessoa (CLONINGER, 1999), fator importantíssimo na Educação.

A teoria é formulada de maneira que permita a compreensão de forma explícita em doze postulados sucintos. Kelly escreveu num período da psicologia americana em que os

postulados teóricos formais estavam em evidência. Essas doze formulações consistem em um postulado fundamental e onze corolários.

O postulado fundamental de Kelly (1955) diz: “Os processos de uma pessoa são psicologicamente canalizados pelas maneiras como ela antecipa os acontecimentos” (CLONINGER, 1999, p.427). Um exemplo que bem caracteriza o postulado acima, foi o boato que ocorreu em Recife, na década de 70, que afirmava o estouro da barragem de Tapacurá e que inundaria toda a região do centro do Recife, provocando pânico nas pessoas e antecipando, desta forma, os eventos que poderiam acontecer. O simples fato de colocar o indivíduo diante de um evento faz com que, naturalmente, ele tente prever o que irá acontecer. Se os acontecimentos ocorrerem como foram antecipados, houve uma *confirmação*. Caso contrário, houve *desconfirmação*. Com o boato, houve uma *desconfirmação* da informação, para felicidade dos recifenses!

Para compreender o postulado e os corolários apresentamos o quadro a seguir dentro de visão panorâmica que permita estruturar os onze corolários da teoria dos construtos pessoais de George Kelly, dentre os quais será escolhido aquele utilizado como ferramenta metodológica para esta pesquisa.

Quadro 1 – Corolário da teoria dos construtos pessoais

Corolário	Enunciado
Processo de Construção	Uma vez que antecipar (ou construir) acontecimentos é tão importante, Kelly descreveu esse processo em detalhe. Quatro dos corolários de Kelly explicam o processo de construção (R.A.Neimeyer, 1987 apud CLONINGER, 1999).
Construção	Uma pessoa antecipa eventos construindo suas réplicas (Kelly, 1955, p.50).
Experiência	O sistema de construção de uma pessoa varia quando ela sucessivamente constrói a réplica de eventos (Kelly, 1955, p.72).
Escolha	Uma pessoa escolhe para si aquela alternativa num construto dicotomizado através do qual ela antecipa a maior possibilidade para a elaboração de seu sistema (Kelly, 1955, p.64).
Modulação	A variação no sistema de construção de uma pessoa é limitado pela permeabilidade dos construtos em cujas faixas de conveniência se encontram as variantes (Kelly, 1955, p.77).
Sistemas de Construtos	Quatro dos corolários de Kelly explicam a estrutura dos sistemas de construtos (R.A.Neimeyer, 1987 apud CLONINGER, 1999).
Dicotomia	O sistema de interpretação de uma pessoa é composto por um número finito de construtos dicotômicos (Kelly, 1955, p.59).
Organização	Cada pessoa caracteristicamente desenvolve, para sua conveniência em antecipar eventos, um sistema de construção que possui relações ordinais entre os construtos (Kelly, 1955, p.56).
Fragmentação	Uma pessoa pode sucessivamente empregar uma variedade de subsistemas de construção que são inferencialmente incompatíveis entre si (Kelly, 1955, p.83).
Séries ou Faixa	Um construto é conveniente para a antecipação de apenas uma faixa finita de eventos (Kelly, 1955, p. 68).
Contexto Social	Os construtos pessoais são particularmente importantes para se compreender o comportamento interpessoal. Os três últimos corolários de Kelly colocam o processo de construção no seu contexto social (R.A.Neimeyer, 1987 apud CLONINGER, 1999).
Individualidade	As pessoas se diferenciam uma das outras nas construções de eventos (Kelly, 1955, p.55).
Comunidade	Na medida em que uma pessoa usa uma construção da experiência que é similar àquela empregada por outra, seus processos são psicologicamente similares àqueles da outra pessoa (Kelly, 1955, p.90).
Sociabilidade	Na medida em que uma pessoa constrói o processo de construção de outra, ela pode desempenhar um papel num processo social envolvendo a outra pessoa (Kelly, 1955, p.95).

Fonte: Adaptado de Cloninger (1999, p.429-435).

A seguir, tem-se a escolha do corolário que será relevante para esta pesquisa. Como nos propusemos a investigar o Pensamento Transdisciplinar como uma abordagem para auxiliar a compreensão do Princípio da Dualidade da Luz, preferivelmente, no processo de construção

para essa investigação, será utilizado o Corolário da Experiência e o Ciclo da Experiência de George Kelly, como ferramenta metodológica.

4.2 Corolário da Experiência

Os construtos, segundo Kelly, podem mudar. O Corolário da Experiência é a formulação de Kelly (1955) de um princípio de desenvolvimento. Ele afirma que: “O sistema de construção de uma pessoa varia à medida que ela constrói sucessivamente a réplica dos acontecimentos” (CLONINGER, 1999, p.430).

Numa perspectiva voltada para o processo de construção do conhecimento sobre a Dualidade da Luz, após os alunos terem vivenciado os três experimentos didáticos e terem participado da oficina Transdisciplinar, espera-se que eles tenham ampliado seus construtos à medida que possam construir réplicas de eventos relacionados ao Princípio da Dualidade da Luz.

4.3 Ciclo da Experiência de George Kelly

A teoria de Kelly explica o que ocorreu durante a vivência do Ciclo da Experiência (CLONINGER, 1999). Os eventos são antecipados de modo que o indivíduo passa por cinco etapas abaixo descritas:

Na primeira etapa de **antecipação**, é o momento quando o aluno prevê o evento, formulando sua hipótese. Nessa ocasião, foi realizado um contato inicial, feitas as apresentações e encaminhado, ao grupo de alunos, o propósito desta pesquisa, sendo entregue o questionário de pesquisa.

Na segunda etapa de **investimento**, é o momento de “investir”, de alguma maneira, para participar de um evento de forma satisfatória. Nessa ocasião, foi entregue aos alunos um texto introdutório para leitura, sobre o Princípio da Dualidade da Luz e o Pensamento Transdisciplinar.

Na terceira etapa de **encontro**, é quando ocorre o evento, ou seja, o contato dos alunos com os três experimentos e da oficina Transdisciplinar. Nessa etapa, ocorre o confronto das hipóteses levantadas durante a etapa de Antecipação, agora vivenciada por eles nas três práticas

experimentais que são: cuba de onda, numa perspectiva de onda mecânica; dupla fenda de Young, enquanto onda eletromagnética; o radiômetro de Crookes, numa perspectiva de corpúsculo e a oficina Transdisciplinar, dentro de um contexto de complexidade da lógica do terceiro incluído e dos diferentes níveis de Realidade. Esses três pilares estão voltados para o Princípio da Dualidade da Luz.

Na quarta etapa de **confirmação ou desconfirmação**, é o momento do aluno testar suas hipóteses, confirmando-as ou desconfirmando-as a respeito do que previu sobre o Princípio da Dualidade Luz.

Na quinta etapa de **revisão construtiva**, o aluno se coloca a pensar em toda a situação e, se for o caso, ampliar o seu limite de validade de sua hipótese inicial e por fim, tirar as suas conclusões.

Após essa *revisão construtiva*, esperamos que os alunos envolvidos nessa proposta de ensino-aprendizagem tenham aproveitado para ampliar seus construtos sobre o Princípio da Dualidade da Luz e que a Transdisciplinaridade, com seus pilares, permitam validar suas hipóteses a respeito dos acontecimentos.

5 METODOLOGIA

5.1 Caracterização do sujeito e campo de pesquisa

O nosso campo de pesquisa foi a Universidade Federal Rural de Pernambuco, por ser reconhecida como uma instituição de ensino pública de qualidade, tendo, na sua vivência de quatro décadas, contribuído na formação acadêmica de professores de Física e, por esta razão, é um local propício para nossa pesquisa. A turma escolhida para a realização da pesquisa foi a de Instrumentação para o Ensino da Física II de 2008.1 da UFRPE do 8º período, sendo estabelecido o critério de que o aluno já tivesse cursado as disciplinas de Física Geral e Experimentação IV e a Física Moderna, que são disciplinas pré-requisitos para a Instrumentação para o Ensino da Física II e por tratar-se de uma disciplina que elabora experimentos didáticos para o ensino da Física, e ainda, por ser o meu coorientador, professor dessa disciplina. A turma era constituída por 8 (oito) alunos, no entanto, 3 (três) participaram de todo o processo da pesquisa, sendo a ausência dos demais justificada por motivos pessoais.

5.2 Instrumentos de pesquisa

A coleta de dados foi feita através da observação e registro da participação dos alunos durante o Ciclo da Experiência e de questionários abertos.

5.3 Passos metodológicos

A nossa metodologia foi construída como um Ciclo da Experiência de Kelly, em que a etapa da *antecipação* foi realizada desde o momento em que os alunos foram convidados para participarem da pesquisa. Inclusive, quando foram discutidos os objetivos e a metodologia que seria aplicada (o Ciclo da Experiência de Kelly). Dessa forma, os alunos, nesta etapa, responderam um questionário (Apêndice A) composto de 4 (quatro) perguntas, que abordavam questões relacionadas ao Princípio da Dualidade da Luz.

A segunda etapa do Ciclo da Experiência de Kelly (*investimento*) foi contemplada com a leitura de um texto sobre a temática (Apêndice B) feita pelos alunos, juntamente com um segundo questionário (Apêndice C) composto de 3 (três) questões do texto sobre o tema da pesquisa.

Após essa etapa, iniciamos o *encontro*, em que foram desenvolvidas três abordagens experimentais e uma oficina Transdisciplinar, sendo que, cada intervenção didática foi vivenciada pelo Ciclo de Kelly (Anexo B), com um intervalo de 8 (oito) dias para cada um dos três experimentos e 15 (quinze) dias para a realização da oficina Transdisciplinar.

Cada intervenção (Apêndice D, E, F e G) teve duração de 100 (cem) minutos e foi vivenciada com a participação de 8 (oito) alunos da turma. Entretanto, apenas 3 (três) participaram integralmente de todo o Ciclo da Experiência de George Kelly.

Essa etapa foi realizada da seguinte maneira: apresentação do primeiro experimento (cuba de onda), que tratou sobre o comportamento ondulatório e a apresentação de um software, conhecido como “wave-interference”, abordando o mesmo tema, provocando discussão sobre os fenômenos envolvidos e, por fim, uma questão aberta sobre o experimento para que os alunos respondessem. “Sua forma de conceber o conceito vivenciado mudou em que após o experimento?”. Após 8 (oito) dias, realizou-se a apresentação do segundo experimento (dupla fenda de Young), que tratou sobre o comportamento ondulatório de uma onda luminosa (laser), apresentação de um software “wave-interference”, sobre o mesmo assunto, levando a uma discussão sobre os fenômenos envolvidos e, por fim, a mesma questão aberta sobre o experimento para que os alunos respondessem. Depois de 8 (oito) dias, apresentação do terceiro experimento (radiômetro de Crookes), sobre o comportamento corpuscular da luz, apresentação de um vídeo chamado de “Dr. Quantum”, abordando o mesmo tema, realizando então uma discussão sobre os fenômenos envolvidos e, por fim, a questão aberta já acima exposta sobre o experimento para que os alunos respondessem.

A quarta etapa da *confirmação ou desconfirmação* ocorreu quando os alunos, diante do *encontro*, puderam confrontar suas concepções com o novo conhecimento, com as novas descobertas que fizeram a partir de uma oficina Transdisciplinar, que aconteceu 15 (quinze) dias após o último experimento. Nessa oficina, os alunos assistiram a uma palestra proferida pelo professor Dr. Romildo Nogueira sobre a Transdisciplinaridade, seguida de uma discussão sobre a temática e, como fechamento, foram apresentados o software acima citado, assim como o vídeo “Dr. Quantum” e um texto de Nicolescu, encaminhado para leitura reflexiva individual.

A quinta etapa da *revisão construtiva* foi contemplada com a aplicação do mesmo questionário (Apêndice A), aplicado na etapa da Antecipação, agora, com o objetivo de investigar se os alunos fizeram uma *revisão construtiva* sobre o Princípio da Dualidade da Luz.

5.4 Detalhando os três experimentos e a oficina Transdisciplinar

Segundo os Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio (PCNEM), o ensino da Física deve ser voltado para uma realidade do cotidiano do estudante, possibilitando-lhe, competências e habilidades que permitam apropriação para sua vida em sociedade, ou seja, enquanto cidadão.

A Física tem uma maneira própria de lidar com o mundo, que se expressa não só através da forma como representa, descreve e escreve o real, mas sobretudo na busca de regularidades, na conceituação, quantificação das grandezas, na investigação dos fenômenos, no tipo de síntese que promove. Aprender essa maneira de lidar com o mundo envolve competências e habilidades específicas relacionadas à compreensão e investigação em Física (BRASIL, 1999, p.231).

Conforme Moraes (2000), o conceito de experiência é polissêmico, para tanto, é necessário indicar sempre qual a noção de experiência que se quer abordar. Para ele, experimento significa um ensaio científico destinado à comprovação de um fenômeno físico. Portanto, experimentar implica pôr à prova; ensaiar; testar algo. A experimentação se comprova uma hipótese proveniente de experimentos, podendo chegar, eventualmente, a uma lei, reconhecida experimental.

Um verdadeiro experimento é aquele que permite ao aluno decidir como proceder nas investigações, que variáveis manipular, que medidas realizar, como analisar e explorar os dados obtidos e como organizar seus relatórios. Portanto, um experimento constitui-se numa atividade prática em que o aluno é orientado a investigar um problema. As atividades experimentais orientados pelo professor devem possibilitar aos alunos melhor compreensão dos processos de ação das Ciências (MORAES, 2000, p.203).

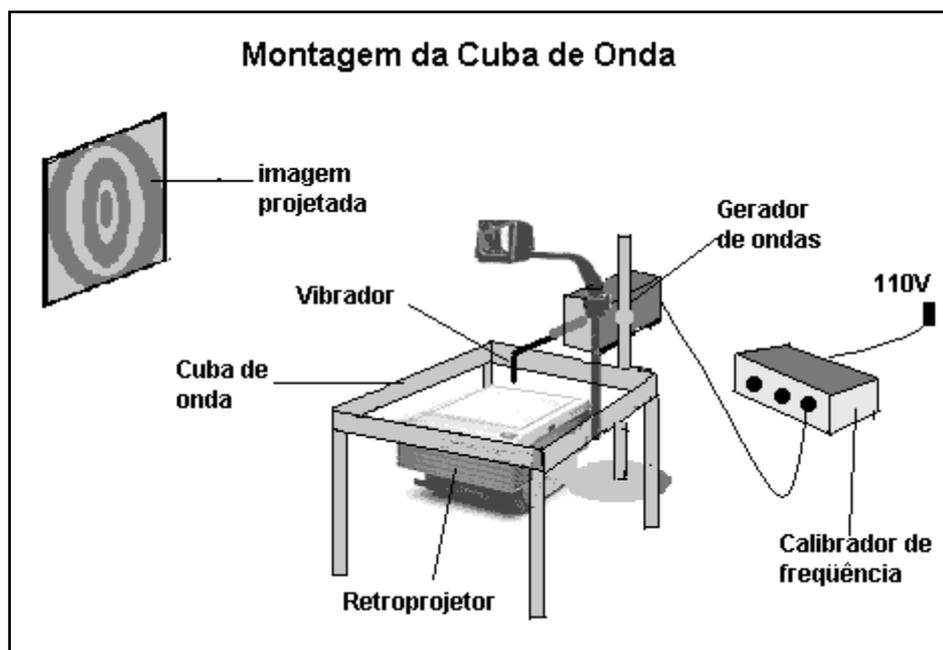
Quando se pensa em verificar ou comprovar uma lei científica, partindo de uma hipótese ou mesmo de um modelo, realizam-se experiências para comprovar a veracidade dessa lei. Uma possível dificuldade percebida pelos alunos é que, independentemente de se comprovar um fato científico, isso não impede de se encontrar um resultado diferente da experiência anterior (FOUREZ, 1995).

O que se pretende com os experimentos escolhidos, não é comprovar os fatos, mas trabalhar os conceitos que estão inseridos no Princípio da Dualidade da Luz. Os experimentos envolvidos para essa pesquisa foram: cuba de onda, abordando propriedade e característica de movimento ondulatório, dupla fenda de Young, ainda enquanto característica de movimento ondulatório, e o radiômetro de Crookes, simulando a ideia de partícula ou corpúsculo. Devido à natureza dos experimentos escolhidos para essa intervenção didática estão envolvidos diretamente no Pensamento Transdisciplinar que são relacionados aos níveis de Realidade, a lógica do terceiro incluído e a complexidade da natureza da luz. Sua análise e discussão durante as etapas do Ciclo da Experiência de Kelly, foram conduzidas no sentido de levar os alunos a uma reflexão a respeito da dualidade onda-partícula.

A análise destes três experimentos foi de estudo qualitativo, uma vez que o principal objetivo da sua utilização foi promover uma discussão a respeito do Princípio da Dualidade da Luz.

5.4.1 Experimento cuba de onda

FIGURA - 2 Cuba de onda



Fonte: http://educar.sc.usp.br/sam/cuba2/exp_5difracao.html

A figura 2 apresenta um esquema da montagem experimental de produção de onda mecânica em um tanque com água, conhecido como cuba de onda. O gerador de ondas será calibrado com uma frequência que permita vibrar paletas, produzindo desta forma ondas mecânicas no interior da cuba de ondas. O retroprojetor será utilizado com apoio, auxiliando a projetar a

imagem que está sendo formada no interior da cuba de ondas, e, desta forma, sendo projetada na parede da sala.

Um tanque de água rasa possui ondas geradas por dois martelinhos oscilantes que batem simultaneamente para cima e para baixo, gerando ondas planas na superfície de uma cuba de onda. Essas ondas se desviam na borda de obstáculo e produzem ondas semicirculares, quando passam por um orifício pequeno.

O fenômeno da difração produzido pela onda e a existência de uma figura de interferência na experiência das duas fendas fornecem uma evidência da propriedade característica de movimento ondulatório.

Objetivo geral do experimento

Compreender o comportamento ondulatório da onda mecânica em um tanque (cuba) de água rasa, durante o Ciclo da Experiência de Kelly.

Objetivos específicos do experimento

- Compreender e analisar o fenômeno da difração que é caracterizada pela passagem da onda pela fenda;
- Compreender e analisar o fenômeno da interferência que é caracterizada pela formação de figuras de interferência.
- Compreender e analisar os padrões de interferência que é caracterizada pela interferência perfeitamente construtiva e destrutiva.

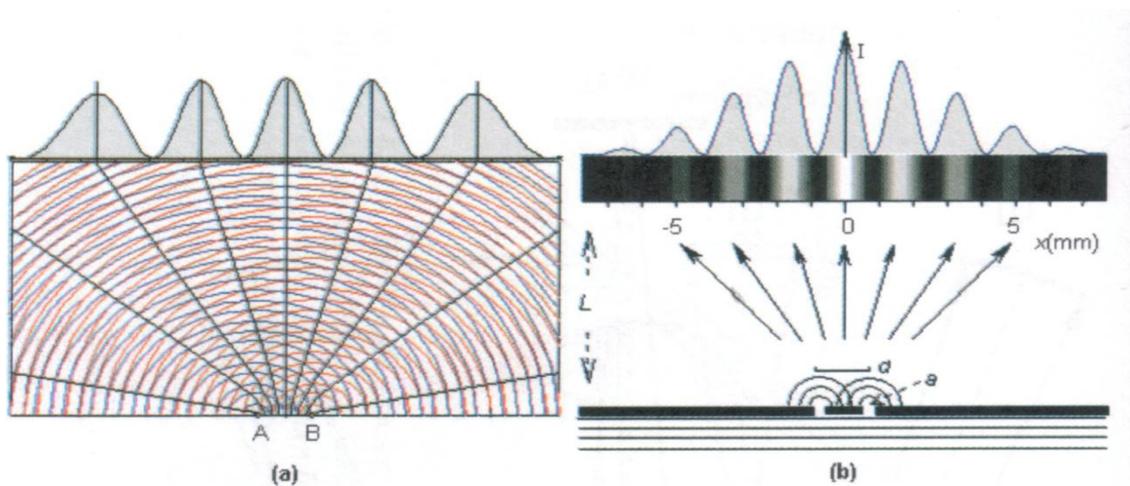
Competências (Saber) e habilidades (Saber fazer)

É possível que, ao final dessa etapa do *encontro* do experimento, cada estudante seja capaz de compreender e explicar os fenômenos da difração e da interferência de uma onda.

Descrição do experimento cuba de onda

Um tanque ou cuba de ondas, constituído por geradores de ondas formadas por dois martelinhos oscilantes que batem simultaneamente. Dessa forma, as duas fontes oscilam com a mesma fase e com a mesma frequência – são duas fontes coerentes (fontes coerentes são fontes cuja diferença de fase é constante), que produzem uma figura típica de interferência. Essas ondas se desviam na borda do obstáculo e produzem outras semicirculares, quando passam por um orifício menor do que o comprimento de onda.

FIGURA - 3 Difração e figuras de interferência (a) e Interferência modulada pela difração (b)



Fonte: Barthem, 2005, p. vi

A figura 3 (a) Apresenta um esquema mostrando a interferência entre ondas esféricas geradas a partir dos pontos puntiformes **A** e **B**. No alto, é representada a intensidade da onda resultante em função da posição. (b) Figura de interferência de feixe de luz, proveniente da parte inferior da figura, difratadas por duas fendas de largura **a** e separadas por uma distância **d**. Nesse caso, a distância **L** entre o plano das fendas e o anteparo é assumida como sendo muito maior que **d** e **a**.

FIGURA - 4 Cuba de onda em funcionamento



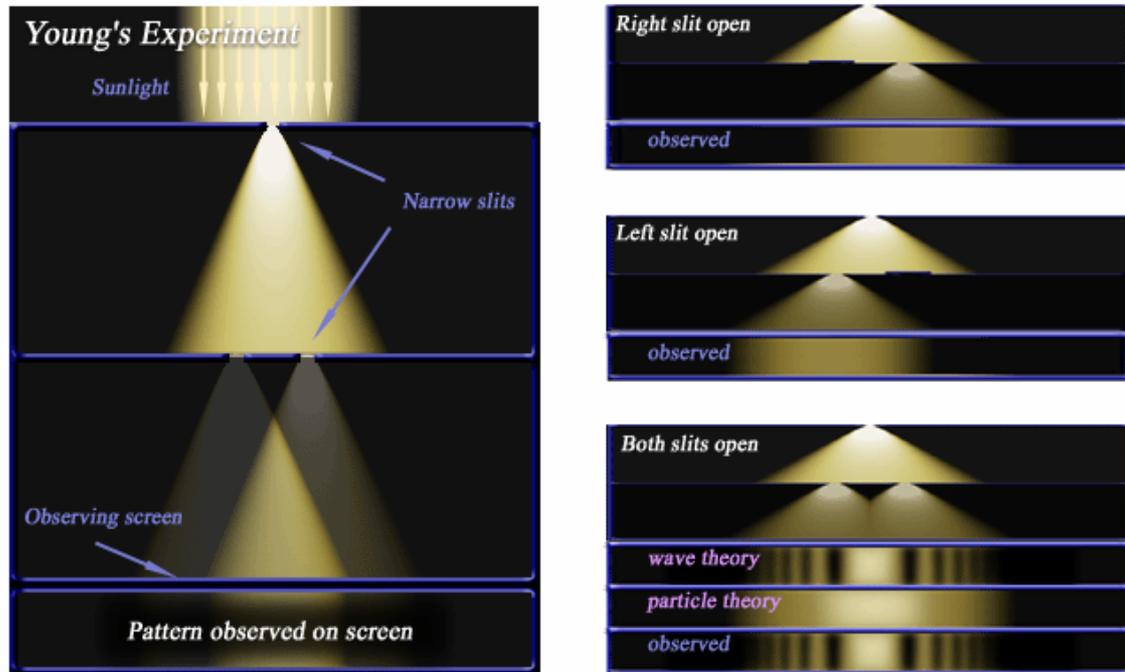
Fonte: Departamento de Física da UFRPE, 2008

Estratégia didática na abordagem da cuba de onda

Salienta-se que durante todas as três experiências foi utilizado, como estratégia, o Ciclo de Kelly. Foi empregada, para essa prática experimental, a confecção de dois modelos de fendas em papelão: uma fenda com uma abertura e a outra com duas, que permitiram criar situações didáticas, deixando apenas um martelinho vibrar e gerando ondas ao passar por uma única fenda, quando perguntamos aos alunos o que eles observaram, respondendo eles que a onda difratava e continuava a sua propagação. Em seguida, em uma outra situação, foi colocado apenas um martelinho, gerando ondas com duas fendas, questionando-os da mesma maneira e eles explicitaram que a onda difrata e continua a sua propagação. Em outro momento, aplicamos idêntico procedimento, mas com dois martelinhos, gerando ondas, passando por uma única fenda. Questionamos os alunos do mesmo modo, explicando eles que a onda difrata e continua a sua propagação. Encerramos a experiência com duas fendas, quando então eles responderam que a onda difrata e continua a sua propagação, produzindo figuras de interferência construtiva e destrutiva. Concluimos então que o experimento, de fato, contribuiu para que os alunos construíssem ou ampliassem seus construtos a respeito do conceito de difração e de interferência que estão relacionados ao movimento ondulatório.

5.4.2 Experimento da dupla fenda de Young

FIGURA - 5 Dupla fenda de Young



Fonte: www.illuminatingscience.org/waveparticle-duality/

A figura 5 apresenta a experiência da dupla fenda que consiste em deixar que a luz visível se difracte (difração é o fenômeno no qual a luz, ao passar por uma borda, desvia-se e continua a sua propagação) através de duas fendas, produzindo bandas numa tela. As bandas formadas, ou padrões de interferência mostram regiões claras e escuras que correspondem aos locais onde as ondas luminosas interferiram entre si construtiva e destrutivamente.

Em 1801, Thomas Young demonstrou, através da experiência, a natureza ondulatória da luz. A experiência mostra duas fontes coerentes de luz que são produzidas por meio da iluminação de um par de fendas paralelas e estreitas, usando uma única fonte. Foi visto que, quando a luz se depara com uma pequena abertura, esta age como uma fonte puntiforme de ondas. O experimento de Young e de muitos outros realizados demonstraram que a luz se propaga como uma onda. O fenômeno da difração da luz e a existência de uma figura de interferência na experiência das duas fendas fornecem uma evidência das propriedades ondulatórias da luz.

Objetivo geral do experimento

Compreender o comportamento da onda luminosa (laser) como uma onda eletromagnética.

Objetivos específicos do experimento

- Compreender e analisar o fenômeno da difração que é caracterizada pela passagem da onda pela fenda;
- Compreender e analisar o fenômeno da interferência que é caracterizada pela formação de figuras de interferência.
- Compreender e analisar os padrões de interferência que é caracterizada pela interferência perfeitamente construtiva e destrutiva.

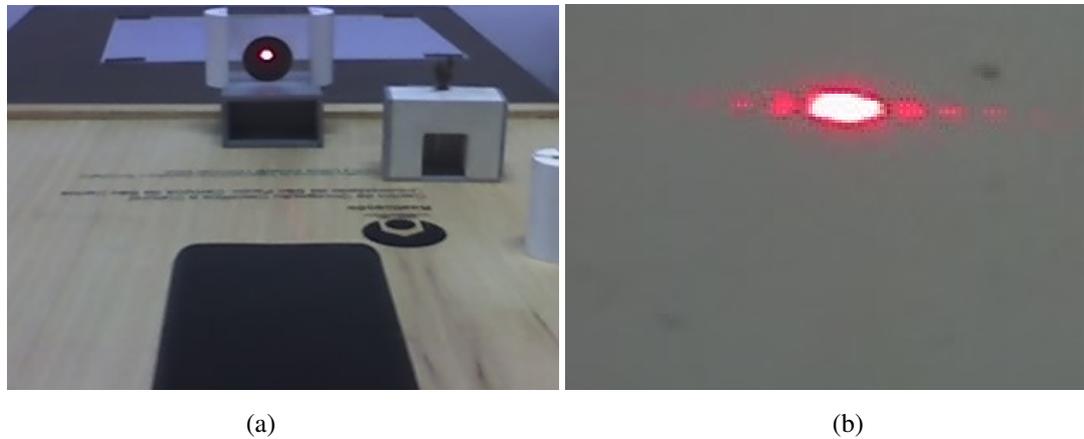
Competências (Saber) e habilidades (Saber fazer)

É possível que, ao final dessa etapa de *encontro* do experimento, cada estudante seja capaz de compreender e de explicar os fenômenos da difração e da interferência de uma onda luminosa (laser).

Descrição do experimento da dupla fenda de Young

A experiência da dupla fenda consiste em deixar que a luz visível se difrate, ao passar por duas fendas, produzindo bandas numa tela. As bandas formadas, ou padrões de *interferência*, mostram regiões claras e escuras que correspondem aos locais onde as ondas luminosas produzem uma figura de interferência formada por um máximo central largo, máximos secundários (ou laterais) menos intensos e mais estreitos e mínimos.

FIGURA - 6 Difração produzida por um raio laser (a) e Franjas de interferência (b)



Fonte: Departamento de Física da UFRPE, 2008

Estratégia didática da abordagem da dupla fenda de Young

Foi utilizada, para essa prática experimental, uma fonte de laser, duas fendas, sendo que uma delas regulável. Na fenda regulável aberta, foi incidido um feixe de laser, e os alunos questionados sobre o que observaram, responderam que a luz, ao passar pela fenda a atravessou sem sofrer nenhum desvio. Ajustando a fenda regulável e incidindo sobre ela um feixe de luz, perguntamos-lhes sobre o que observaram, dizendo eles que a luz, ao passar pela fenda, sofreu desvio, continuou a sua propagação e, em seguida, houve a sua projeção na parede, formando franja de interferência construtiva e destrutiva.

Com o propósito de promover uma discussão entre os alunos, utilizamos uma segunda fenda, aplicando nela outro feixe de luz. Indagando os alunos sobre o que eles observaram, disseram eles que a luz, ao passar pela fenda, difrata e continua a sua propagação e, em seguida, projeta na parede da sala as franjas ou padrões de interferência.

5.4.3 Experimento radiômetro de Crookes

FIGURA – 7 Radiômetro de Crookes



Fonte: Departamento de Física da UFRPE, 2007

A figura 7 apresenta o experimento radiômetro de Crookes que consiste em quatro hélices presas em braços que podem girar em torno de um ponto vertical com atrito muito pequeno. Todo o mecanismo é encapsulado em um invólucro de vidro e o gás é parcialmente evacuado por uma bomba, como mostra a fig. 07. As hélices, dispostas alternadamente, têm tons claros (prateado) e escuros (preto), que começam a girar, enquanto a luz de qualquer natureza (solar, artificial ou até mesmo radiação infravermelha produzida pelo calor da mão) incidem em sua superfície. O resfriamento do radiômetro causa rotação em sentido contrário (Studart, 2007).

Uma possível causa de rotação é a pressão de radiação exercida pela luz. Se a luz incidir ortogonalmente sobre a superfície das pás como está na fig. 07, a luz incidente sobre a face preta seria absorvida com a transferência do momento linear da luz para a pá; a luz incidente sobre a face branca seria refletida, invertendo o momento linear da luz e transferindo, em dobro, outro tanto de momento linear à pá, então o momento linear líquido, transferindo ocasionalmente a rotação das pás com a face preta, indo à frente da face branca, mas, se observarmos a rotação, veremos que o lado branco está sempre indo na frente. O problema é que o vácuo no invólucro não é bom, e, desta forma, o ar, em seu interior, desempenha um papel importante no movimento. Como a pá preta absorve a energia luminosa, enquanto a face branca reflete, a face preta torna-se mais quente que a face branca. Essa diferença de temperatura ocasiona o movimento das pás devido à circulação do ar no bulbo e à transferência de momento linear. As moléculas de ar que entram em contato com a pá

afastam-se dela com uma energia que depende da temperatura da pá no local de contato. As moléculas que se afastam da face preta (mais quente) têm, em média, uma energia cinética maior do que aquela que se afasta da face branca (mais fria). Assim, o momento linear de recuo da pá é maior na face preta quente que na face branca fria. Como resultado, a pá ganha um momento linear líquido, girando de tal modo que a face branca está sempre indo na frente. É esta transferência de momento linear que ajuda a ocasionar a rotação das pás e não o momento linear da luz (HALLIDAY et al.,1995).

A explicação baseada em colisões de quanta de luz apenas sobrevive para experiências extremamente sofisticadas com radiômetro com ultravácuo, o que não corresponde aos usuais moinhos de luz (Studart, 2007).

Objetivo geral do experimento

Verificar o efeito de colisões de quanta de luz, produzidas com radiômetro de pressão.

Objetivos específicos do experimento

- Compreender e analisar o fenômeno da radiação de pressão no moinho de luz;
- Compreender e analisar a transferência de momento linear.

Competências e habilidades

É possível que, ao final dessa etapa de *encontro* do experimento, cada estudante seja capaz de descrever e explicar o funcionamento moinho de luz.

Descrição do experimento radiômetro de Crookes

William Crookes (1832-1919) desenvolveu seu radiômetro em 1873 com um dispositivo para medir a energia radiante do calor (infravermelho) e da luz solar ao investigar o efeito da radiação infravermelho sobre o elemento químico tálio. O radiômetro de Crookes, também conhecido como moinho de luz, foi projetado como medidor de radiação, mas hoje pode ser considerado como um objeto de decoração, ou mesmo, um instrumento para ser utilizado como recurso didático, por estudantes em sala de aula (Studart, 2007).

FIGURA - 8 Radiômetro de Crookes em funcionamento



Fonte: Departamento de Física da UFRPE, 2008

Estratégia didática da abordagem do radiômetro de Crookes ou moinho de luz

Foi utilizado para essa prática experimental um radiômetro de Crookes e uma lanterna de fonte luminosa incandescente. No moinho de luz foi aplicado um feixe de luz e logo em seguida as pás começaram a se mover então perguntamos aos alunos o que eles observaram e eles disseram que, quando a luz incidiu, as pás começaram a se mover por causa da temperatura interna; outros disseram que era pela reflexão e absorção da luz, em seguida perguntamos o que aconteceu quando a luz deixou de incidir, e eles disseram que as pás começaram a parar por causa do atrito. Continuamos a provocar discussão e eles disseram que o motivo da rotação das pás foi por causa da termodinâmica ou devido à colisão do quantum de luz.

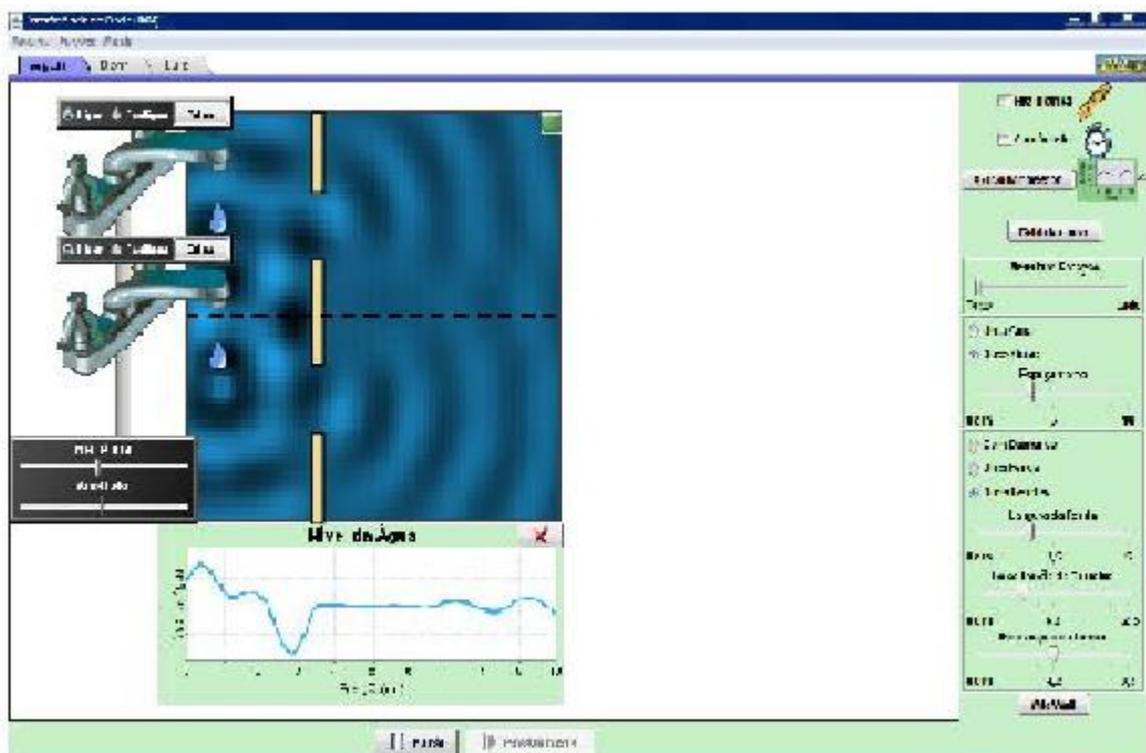
5.4.4 Oficina Transdisciplinar

No primeiro momento da oficina, foi realizada uma palestra, ministrada pelo Prof. Dr. Romildo Nogueira a respeito do Pensamento Transdisciplinar. Após a palestra, houve, num segundo momento, um debate, provocando desta forma uma discussão sobre o tema abordado, mediada pelo pesquisador.

No terceiro momento, após a apresentação de um software conhecido como “wave-interference”, que representa, mediante uma simulação, o comportamento da onda em um tanque com água rasa, descrevendo os fenômenos da difração e da interferência enquanto movimento ondulatório. Em seguida, houve uma discussão sobre o tema observado. E, por fim, um vídeo do youtube – “Dr. Quantum”, representando o fenômeno da difração e da interferência, enquanto corpúsculo ao passar pela dupla fenda de Young, demonstrando o comportamento do elétron enquanto matéria, reproduzindo um comportamento de uma onda levando a uma discussão sobre os fenômenos observados.

Salientamos que o software foi apresentado em dois momentos: no primeiro, para representar o comportamento de uma onda mecânica e no segundo, para representar o comportamento de uma onda luminosa.

FIGURA - 9 Software simulando o comportamento da onda mecânica

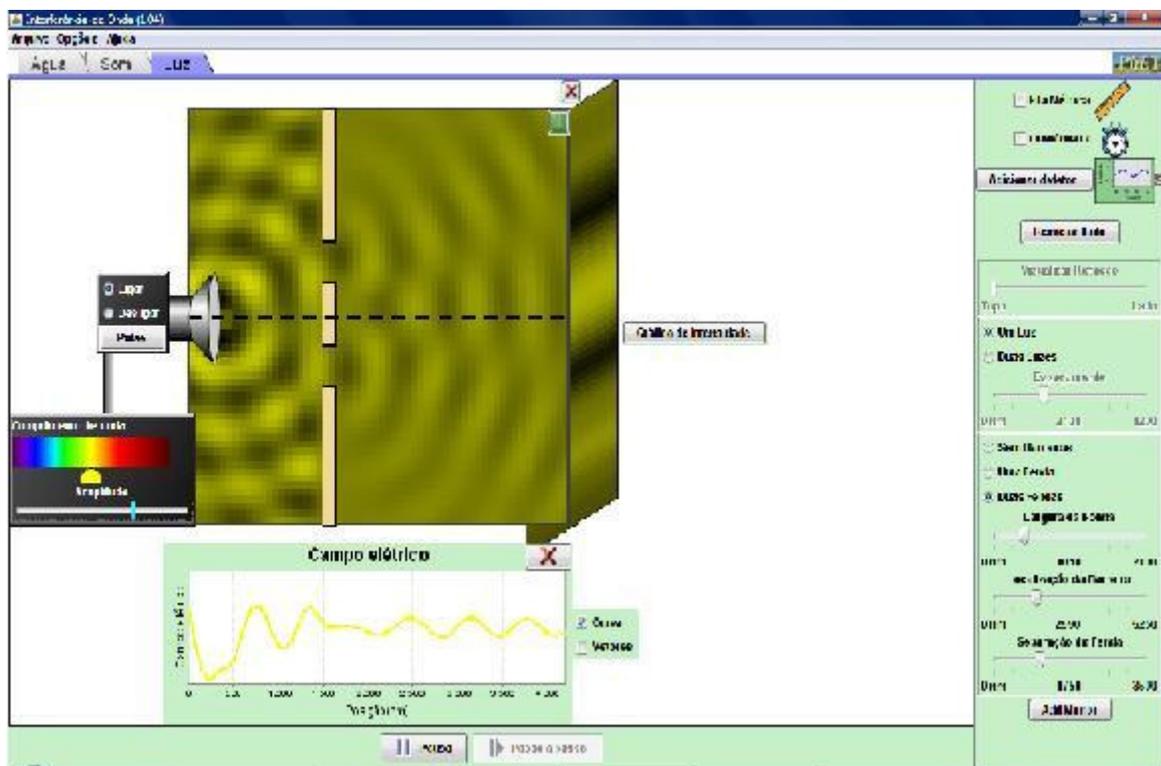


Fonte: http://phet.colorado.edu/simulations/sims.php?sim=Wave_Interference

A figura 9 mostra um software que simula um comportamento ondulatório de uma onda mecânica, conhecido como: “wave-interference”. Esse experimento consiste em representar, através de simulação, o fenômeno da difração gerada por duas fontes de gotas de água em queda livre, produzindo ondas esféricas que ao passarem por duas fendas, sofrem difração e

essas ondas, quando projetadas no anteparo, formam padrões de interferência construtivas e destrutivas, características de movimento ondulatório.

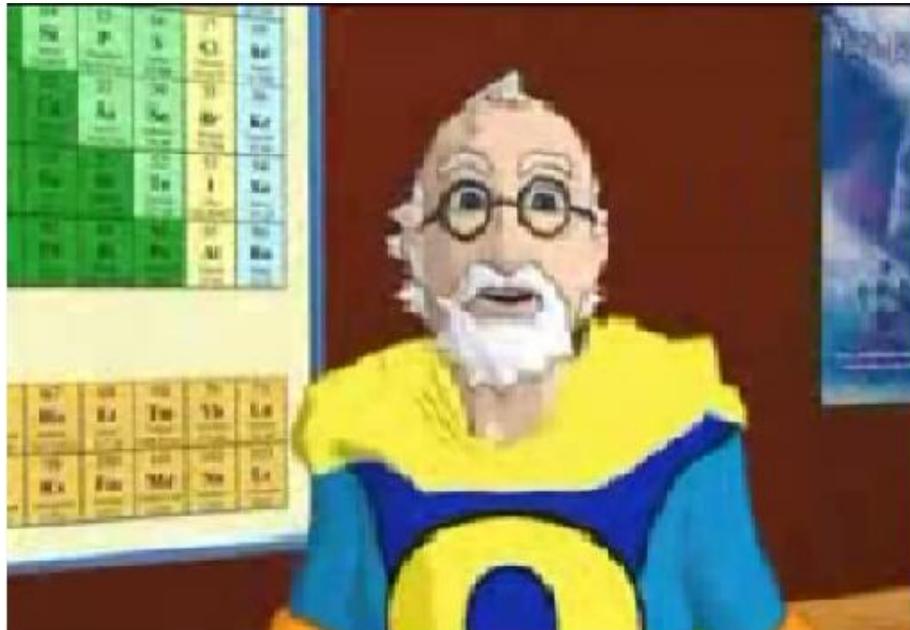
FIGURA - 10 Software simulando o comportamento da onda luminosa



Fonte: http://phet.colorado.edu/simulations/sims.php?sim=Wave_Interference

A figura 10 mostra um software que simula um comportamento ondulatório de uma onda luminosa ou eletromagnética. Esse experimento consiste em representar, através da simulação, o fenômeno da difração gerada por duas fontes de energia luminosas, produzindo ondas esféricas que, ao passarem por duas fendas, sofrem difração e essas ondas, quando projetadas no anteparo, formam padrões de interferência construtivas e destrutivas, que caracterizam o movimento ondulatório.

FIGURA - 11 Um vídeo Dr. Quantum



Fonte: DVD - QUEM SOMOS NÓS, 2005

A figura 11 apresenta um vídeo do youtube – “Dr. Quantum” tem a finalidade de apresentar os fenômenos da difração e da interferência, enquanto corpúsculo ao passar pela dupla fenda de Young.

Ao término dessa oficina, foi encaminhada para os alunos, uma leitura reflexiva de um texto composto de dez páginas escrito por Basarab Nicolescu. “Um novo tipo de Conhecimento – Transdisciplinaridade”. Disponível em:

<http://scholar.google.com.br/scholar?q=Um+novo+tipo+de+Conhecimento+%E2%80%93+Transdisciplinaridade&hl=pt-BR&um=1&ie=UTF-8&oi=scholar>; acesso em 01 / 04 / 08.

Objetivo geral da oficina Transdisciplinar

Discutir as bases do Pensamento Transdisciplinar e seus pilares na possibilidade de contribuir para a compreensão do Princípio da Dualidade da Luz.

Competências e habilidades

É esperado que, ao final dessa discussão, no momento de *encontro* da oficina que os estudantes tenham competências necessárias para entender os pilares da Transdisciplinaridade, que são: os níveis de Realidade, a lógica do terceiro incluído e a complexidade e estejam habilitados para utilizar esses conceitos na compreensão do Princípio da Dualidade da Luz.

Descrição das atividades da oficina Transdisciplinar

- Descrição detalhada da programação da oficina Transdisciplinar

Primeiro momento – foi realizada uma palestra, proferida pelo Prof. Romildo Nogueira (orientador dessa dissertação), a respeito do Pensamento Transdisciplinar, abordando questões como: a disciplinaridade, Transdisciplinaridade e seus pilares, operadores de ligação do pensamento complexo que são: a ideia de emergência; a ideia de circularidade; o operador hologramático e operador dialógico, como também os axiomas da lógica clássica: 1. Identidade: $A \text{ é } A$; 2. Não contradição: ($A \text{ não é não } A$); 3. Terceiro excluído: não existe um terceiro termo T (terceiro incluído) que seja ao mesmo tempo (A e não A). Na palestra foi mostrado que a introdução de diferentes níveis de Realidade permite a inclusão de um terceiro termo T (terceiro incluído) que unifica A e não A .

Segundo momento – foi promovido um debate com os alunos sobre o Pensamento Transdisciplinar: Uma abordagem para o Princípio da Dualidade da Luz.

Terceiro momento – foi realizado uma apresentação de um software “wave-interference”, mostrando o comportamento ondulatório de onda mecânica e luminosa e, em seguida, um videoclipe do youtube – “Dr. Quantum”, que apresenta virtualmente o experimento da dupla fenda de Young, enquanto matéria, como o elétron descrevendo comportamento ondulatório.

Por fim, foi entregue à turma um texto para reflexão: “Um Novo tipo de Conhecimento – Transdisciplinaridade¹”, Basarab Nicolescu².

Estratégia didática da abordagem da oficina Transdisciplinar

Inicialmente o Dr. Romildo Nogueira realizou uma palestra a convite do pesquisador. Após a palestra a respeito do Pensamento Transdisciplinar: Uma Abordagem para compreensão do Princípio da Dualidade da Luz, o coordenador da oficina (pesquisador) franqueou a palavra para que os alunos perguntassem livremente sobre o tema proposto, logo em seguida, promovemos uma discussão em grupo sobre o tema. Aplicamos um software que simula o comportamento ondulatório, para esclarecer as possíveis dúvidas existentes durante a oficina a respeito do movimento ondulatório. Em seguida, fizemos uso de um vídeo do “Dr. Quantum” para esclarecer qualquer dúvida sobre o comportamento corpuscular produzido por elétrons, ao passar por uma dupla fenda de Young e, simultaneamente, procuramos tirar possíveis dificuldades existentes ao longo do processo de construção da oficina Transdisciplinar.

¹ 1º Encontro Catalisador do CETRANS – Escola do Futuro – USP. Itatiba, São Paulo – Brasil: abril de 1999

² Físico teórico do Centro Nacional de Pesquisa da França (C.N.R.S). Fundador e Presidente do Centro Internacional de Pesquisa e Estudos Transdisciplinares (CIRET).

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Primeira etapa do Ciclo da Experiência (Antecipação)

De acordo com Kelly, a etapa de *antecipação* é o momento no qual o aluno prevê o evento formulando sua hipótese sobre o tema em questão. Nessa etapa foi aplicado um questionário com toda a turma, composta de quatro perguntas abertas sobre as concepções prévias dos alunos sobre o Princípio da Dualidade da Luz e da lógica que respalda este Princípio. No entanto, foram analisadas somente as respostas dos três alunos que completaram todo o Ciclo da Experiência de Kelly.

A 1ª questão, visando estabelecer o conhecimento prévio dos estudantes sobre o **Princípio da Dualidade da Luz**, foi: **O que caracteriza o Princípio da Dualidade da Luz?**

O **aluno A** respondeu que esta dúvida em relação à natureza da luz, se dá porque hora se comporta como onda e hora se comporta como se fosse matéria. Este fenômeno que descreve sobre a luz, vem sendo estudado há vários anos pelos maiores Físicos tais como: Maxwell, Lorentz, Newton, Einstein. Com a realização de alguns experimentos no início do século a Ciência começou a observar que a luz apresentava propriedades, isto é, ficou caracterizado pelo experimento de dupla fenda, onde constataram o fenômeno de interferência, logo a luz poderia ser considerada uma onda, mas incrivelmente os cientistas observaram também que quando colocado um “sensor” para determinar por onde passava a luz nas duas fendas a luz passava a se comportar como partículas. Era o que se apresentava no anteparo colocado através das fendas.

Comentário da resposta do aluno A: Nessa resposta demonstrou um conhecimento prévio significativo a respeito da dualidade da luz (*se dá porque hora se comporta como onda e hora se comporta como se fosse matéria*), quando cita cientistas como Maxwell na abordagem da luz como uma onda eletromagnética, Lorentz na pesquisa sobre a natureza da mecânica do éter, Newton na característica corpuscular da luz e Einstein no que se refere a natureza dual da luz, sempre enfatizando a experimentação como uma prova fundamental da natureza dual da luz (*ficou caracterizado pelo experimento de dupla fenda, onde constataram o fenômeno de interferência[...]a luz nas duas fendas passava a se comportar como partículas*). Ainda, demonstrou ter conhecimento de que a luz apresenta dois comportamentos distintos, como onda e como partícula, quando submetida a experimentos distintos.

O **aluno B** respondeu o que caracteriza a dualidade da luz é o fato de que a luz pode ser considerada tanto onda como partícula.

Comentário da resposta do aluno B: Nessa resposta respondeu de forma objetivo (*o fato de que a luz pode ser considerada tanto onda como partícula*), porém não fundamentou a sua resposta com base em pesquisadores que investigaram a natureza dual da luz. Importante foi observar que o aluno entende que a luz apresenta uma natureza dual.

O **aluno C** respondeu que é o fato de que a luz pode ser considerada tanto onda como partícula, ou seja, além das propriedades ondulatórias, a luz se comporta de maneira discreta, pois sua energia é quantizada.

Comentário da resposta do aluno C: Na sua resposta demonstrou ter conhecimento prévio sobre a natureza dual da luz (*é o fato de que a luz pode ser considerada tanto onda como partícula*) e também revelou algum conhecimento sobre a quantização da energia, quando se referiu à luz (*além das propriedades ondulatórias, a luz se comporta de maneira discreta, pois sua energia é quantizada*), se propagando de maneira discreta e tendo sua energia quantizada. É esperado que alunos do oitavo período do curso de Licenciatura em Física como os alunos A, B, C após terem cursado as disciplinas de Física Geral e Experimental IV (que aborda assuntos como: ondas eletromagnéticas e introdução ao estudo da Física Moderna) e a própria disciplina de Física Moderna tenham apreendido os fundamentos necessários para compreensão do Princípio da Dualidade da Luz. Portanto, as respostas dadas pelos alunos A, B e C são estão de acordo para esta etapa de formação do Curso de Licenciatura em Física.

A 2ª questão do questionário, “**Pensar que a luz pode comportar-se de forma dual é razoável? Justifique sua resposta**”, visa investigar como os alunos pensam a questão da dualidade onda-partícula do ponto de vista lógico.

O **aluno A** respondeu que sim. Com a chegada da Física Moderna, onde se estuda objetos com dimensões atômicas e também com altas velocidades. Nesta área se comprovou através de experimentos (indutivismo ingênuo) que a luz realmente se comporta hora como luz, hora como partícula.

Comentário da resposta do aluno A: Na sua resposta afirmou que sim. Mas não justificou sua resposta, apenas cita a surgimento da Física Moderna como algo que permite compreender universos com dimensões pequenas e de altas velocidades (*chegada da Física Moderna, onde se estuda objetos com dimensões atômicas*), dando ênfase à demonstração experimental, querendo justificá-la como comprobatório do fenômeno como algo real, esquecendo o aluno

de que a experimentação é apenas uma representação (*comprovou através de experimentos*): ainda o aluno não cita qualquer possibilidade da existência de uma lógica que trabalhe com a dualidade.

O **aluno B** afirmou que sim. Se tomarmos a luz como uma onda, ou seja, essa onda possui características e propriedades ondulatórias e se admitirmos que ao mesmo tempo ela é formada por quantas de luz, quer dizer, como sendo discreta. Então o fato dela se comportar de maneira dual é razoável. Pois, estaríamos nos baseando nessa teoria, a dos quantas de luz (energia quantizada).

Comentário da resposta do aluno B: Na sua resposta não cogitou a possibilidade que possa existir uma lógica que permita compreender o Princípio da Dualidade da Luz. É interessante observar que o aluno não faz nenhuma consideração de como ele pensa o fato de a luz ser onda e partícula, que de fato representa uma contradição do ponto de vista da lógica Aristotélica (*Então o fato dela se comportar de maneira dual é razoável*). O aluno baseado somente numa visão dogmática da Física, não percebe nenhuma contradição lógica neste fenômeno (*Se tomarmos a luz como uma onda, ou seja, essa onda possui características e propriedades ondulatórias e se admitirmos que ao mesmo tempo ela é formada por quantas de luz*). Observamos ainda de que o aluno segue o senso comum, quando aceita o Princípio da Dualidade sem questionar.

O **aluno C** respondeu que sim. Se tomarmos a luz com características e propriedades ondulatórias e se admitimos que ela fosse formada por quantas de luz, quer dizer, como sendo discreta. Então o fato dela se comportar de maneira dual é razoável.

Comentário da resposta do aluno C: Na sua resposta diz que é possível. Mas não conseguiu responder sob uma perspectiva lógica, com ausência de senso crítico (*Se tomarmos a luz com características e propriedades ondulatórias e se admitimos que ela fosse formada por quantas de luz*). É interessante observar que, apesar dos três alunos terem demonstrado conhecimentos prévios sobre o Princípio da Dualidade, não perceberam a necessidade de uma nova lógica para respaldar essa dualidade (*Então o fato dela se comportar de maneira dual é razoável*). Faltou-lhes uma visão crítica e capacidade de discernimento para distinguir a dualidade onda-partícula.

A 3ª questão do questionário tem como propósito saber se a lógica Aristotélica, que é uma lógica do terceiro excluído, consegue respaldar através de seus axiomas o Princípio da Dualidade da Luz. A questão foi formulada como segue: **A partir da lógica Aristotélica, que**

se baseia nos seguintes axiomas: 1. O axioma da identidade: A é A (Ferro é Ferro); 2. axioma da não contradição: A não é não A (Madeira não é Ferro); 3. O axioma do terceiro excluído: não existe um terceiro termo T, que ao mesmo tempo seja A e não A (não existe nada que seja Madeira e Ferro). Esta lógica pode ser aplicada ao Princípio da Dualidade da Luz? Justifique sua resposta.

O **aluno A** respondeu que não. Esta visão Aristotélica se aplica muito bem ao Mecanismo Newtoniano da lei Física que perduraram vários séculos. Mas com a chegada da eletrodinâmica de Maxwell, a teoria eletrônica de Lorentz, a troca da relatividade o que antes era considerado absoluto como o tempo o espaço, agora já não mas o era o tempo, o espaço tornaram-se relativo.

Comentário da resposta do aluno A: O aluno, apesar de mostrar alguns conhecimentos prévios sobre as bases da mecânica newtoniana e da eletrodinâmica de Maxwell (*Esta visão Aristotélica se aplica muito bem ao Mecanismo Newtoniano*), em nenhum momento percebeu a contradição lógica inerente ao Princípio da Dualidade (*com a chegada da eletrodinâmica de Maxwell, a teoria eletrônica de Lorentz, a troca da relatividade o que antes era considerado absoluto como o tempo o espaço agora já não mas o era o tempo, o espaço tornaram-se relativo*), mesmo sendo alertado na formulação da pergunta sobre a impossibilidade de um terceiro termo T, que seja ao mesmo tempo A e não A, assim ele demonstrou não perceber que a lógica Aristotélica é uma lógica de exclusão, além de, devido à falta de senso crítico, demonstrou não saber interpretar o enunciado da questão.

O **aluno B** respondeu que não. Pois o Princípio da Dualidade fala exatamente o inverso. Se seguisse está lógica então a luz sendo uma onda não poderia ser também uma partícula e vice-versa.

Comentário da resposta do aluno B: Na sua resposta ficou claro que a lógica Aristotélica é uma lógica de exclusão e que não é adequada para compreender a dualidade da luz (*Princípio da Dualidade fala exatamente o inverso*). Para compreender esse Princípio, será necessário apropriar-se de uma lógica mais complexa que é a lógica do terceiro incluído (*Se seguisse está lógica então a luz sendo uma onda não poderia ser também uma partícula e vice-versa*). Ao contrário do aluno A, este reconhece a inadequação da lógica Aristotélica, demonstrando ter senso crítico.

O **aluno C** respondeu que não. Pois se não existe um termo que ao mesmo tempo seja A e não A então a dualidade da luz seria uma ideia falsa. Por isso, para admitir o Princípio da Dualidade da Luz, teremos que abandonar esta lógica aristotélica para o caso da luz.

Comentário da resposta do aluno C: Justificou que a lógica Aristotélica não é adequada para tratar a dualidade da luz, pois esta é uma lógica do terceiro excluído (*Pois se não existe um termo que ao mesmo tempo seja A e não A então a dualidade da luz seria uma ideia falsa*). O aluno, nessa questão, começa a considerar a necessidade de uma nova lógica, para que ele continue a aceitar o Princípio da Dualidade da Luz (*Por isso, para admitir o Princípio da Dualidade da Luz, teremos que abandonar esta lógica aristotélica para o caso da luz*). Observamos, nesse momento que a pergunta formulada permitiu uma maior reflexão desse aluno sobre o tema.

A 4ª questão tem como propósito saber se a lógica do terceiro incluído que é uma lógica da Transdisciplinaridade permite compreender o Princípio da Dualidade da Luz. Esta questão foi formulada como segue: **A natureza pode ser regida por uma lógica complexa não Aristotélica que leva em consideração diferentes níveis de Realidade, de maneira que exista um terceiro termo T sendo ao mesmo tempo A e não A. Uma lógica desse tipo poderia ser aplicada ao Princípio da Dualidade da Luz? Justifique sua resposta.**

O **aluno A** respondeu que sim. Com as ideias inovadoras de Einstein sobre os fenômenos Físicos, com a criação da teoria da relatividade restrita e geral, os físicos começaram a ter uma visão não mais mecanicista, deixando de lado o indutivismo. Podendo desta forma fazer especulações, criações livre que poderão num futuro mais próximo serem comprovadas através de experimentos práticos. Inclusive esta nova lógica de existir um terceiro termo T sendo ao mesmo tempo A e não A.

Comentário da resposta do aluno C: Nessa resposta é observado que o aluno toma como base as ideias da Física contemporânea para justificar a possibilidade dessa lógica do terceiro incluído, como sendo algo esperado diante das novas descobertas da Física (*Com as ideias inovadoras de Einstein sobre os fenômenos Físicos, com a criação da teoria da relatividade restrita e geral, os físicos começaram a ter uma visão não mais mecanicista, deixando de lado o indutivismo*). Porém, não se apropriou dessa lógica para justificar a dualidade. O aluno deu a entender que, com o advento das novas teorias, os físicos se libertaram do indutivismo, abrindo assim as portas para novas teorias e que estas poderão explicar o Princípio da Dualidade da Luz (*Podendo desta forma fazer especulações, criações livre que poderão num futuro mais próximo serem comprovadas através de experimentos práticos. Inclusive esta nova lógica de existir um terceiro termo T sendo ao mesmo tempo A e não A*).

O **aluno B** respondeu que sim. A natureza é composta de várias partículas (moléculas) que interagem entre si formando novas partículas, e essas novas partículas podem ter características das duas moléculas que se interagem. A luz no caso depende da maneira que queremos tratá-la pode ser onda e/ou partícula.

Comentário da resposta do aluno B: Nessa resposta iniciou uma reflexão sobre o comportamento da natureza do ponto de vista de partículas e moléculas e concluiu com a questão da dualidade, porém de maneira desconexa (*A natureza é composta de várias partículas “moléculas” que interagem entre si formando novas partículas, e essas novas partículas podem ter características das duas moléculas que se interagem*). Não fez nenhuma referência à pergunta que tratava da relação entre a lógica do terceiro incluído e a dualidade da luz (*A luz no caso depende da maneira que queremos tratá-la pode ser onda e/ou partícula*). Faltou, ao aluno melhor reflexão, que permitisse o entendimento da questão devido à ausência de raciocínio lógico.

Comentário da resposta do aluno C: Não respondeu esta questão, apesar de, na questão anterior, ter feito uma boa reflexão sobre a necessidade de uma nova lógica. O aluno sugeriu na questão anterior ser preciso acatar uma nova lógica para que ele pudesse aceitar o Princípio da Dualidade da Luz.

6.2 Segunda etapa do Ciclo da Experiência (Investimento)

Segundo Kelly, na etapa de *investimento*, é o momento de investir, de alguma maneira, para participar de um evento de forma satisfatória. Para essa etapa, foi distribuído com os alunos um pequeno texto elaborado pelo pesquisador sobre o Princípio da Dualidade da Luz e o Pensamento Transdisciplinar (Apêndice B), acompanhado de um questionário aberto, composto de três perguntas sobre o tema. O objetivo desse texto foi introduzir conceitos sobre o Princípio da Dualidade da luz e da Transdisciplinaridade.

Após investirem na leitura do texto, os alunos A, B e C responderam à primeira questão **“Na sua concepção, a luz pode ser ao mesmo tempo onda e partícula? Justifique sua resposta”**.

O **aluno A** respondeu que sim. Com o surgimento da lógica do terceiro incluído onde a luz pode ser considerada A e não A simultaneamente no mundo microscópico (quântico) e com a desvinculação da lógica Aristotélica, onde não haveria a possibilidade de um terceiro incluído (onde ao mesmo tempo pode ser A e

não A); com as experiências realizadas por Young, Einstein e a teoria De Broglie podemos acreditar na dualidade da luz.

Comentário da resposta do aluno A: Na sua justificativa argumentou que a lógica do terceiro incluído torna possível compreender que a luz pode ser onda e partícula (*Com o surgimento da lógica do terceiro incluído onde a luz pode ser considerada A e não A simultaneamente no mundo microscópico (quântico) e com a desvinculação da lógica Aristotélica, onde não haveria a possibilidade de um terceiro incluído*). Acrescentou ainda que as experiências realizadas por Young, Einstein e a teoria de De Broglie reforçam a dualidade da luz (*com as experiências realizadas por Young, Einstein e a teoria De Broglie podemos acreditar na dualidade da luz*). É interessante observar que o aluno sugere a desvinculação da dualidade onda-partícula da lógica Aristotélica. Isto mostra que houve uma compreensão adequada da lógica do terceiro incluído.

O **aluno B** respondeu que sim. Pois um raio de luz pode difratar em um obstáculo (onda) e depois incidir sobre uma superfície metálica provocando assim uma emissão de fotoelétrons (partículas).

Comentário da resposta do aluno B: Na sua resposta diz que sim. Justificou dizendo que a luz pode se comportar como uma onda, ao difratar um obstáculo e como partícula no caso do efeito fotoelétrico, não fazendo, no entanto, nenhuma relação da dualidade onda-partícula com a necessidade de uma lógica complexa que permitisse um terceiro incluído (*Pois um raio de luz pode difratar em um obstáculo (onda) e depois incidir sobre uma superfície metálica provocando assim uma emissão de fotoelétrons (partículas)*), ou seja, a luz ser onda e partícula, apesar de ter lido um texto introdutório sobre a Transdisciplinaridade. Embora tenha ilustrado sua resposta com o fenômeno do efeito fotoelétrico, não soube fazer a interação da lógica do terceiro incluído com a dualidade da luz, faltou-lhe melhor reflexão.

O **aluno C** respondeu que sim. Pois “algo” não precisa ser necessariamente A ou não A ele pode ser as duas coisas, se desconsiderarmos a lógica Aristotélica, desta maneira, a luz pode se comportar ora como onda e ora como “partícula” (discretamente).

Comentário da resposta do aluno C: Na sua resposta demonstrou compreender que a luz pode ser onda e partícula, somente dentro de uma lógica não Aristotélica ([...] *não precisa ser necessariamente A ou não A ele pode ser as duas coisas, se desconsiderarmos a lógica Aristotélica, desta maneira, a luz pode se comportar ora como onda e ora como partícula*). É

observada, na sua resposta, que o aluno já se apropriou da lógica do terceiro incluído, tendo em vista que sua reflexão foi coerente com a pergunta.

Analisando a etapa do investimento dos alunos A, B e C observamos que com relação à 2ª questão: **O Princípio da Dualidade da Luz pode ser compreendido com o auxílio do pensamento Transdisciplinar?**

O **aluno A** respondeu que sim. O pensamento Transdisciplinar é de fundamental importância para o entendimento do princípio da dualidade da luz, os níveis de realidade considerados dentro da lógica e a existência de um terceiro termo o mesmo pode ser considerado A e não A se encaixa muito bem para explicar o princípio da dualidade da luz (no mundo macro e micro).

Comentário da resposta do aluno A: O aluno compreendeu a importância da existência de mais de um nível de Realidade (*no mundo macro e micro*). Que a lógica que envolve tal Princípio não é uma lógica de exclusão e sim de inclusão (*os níveis de realidade considerados dentro da lógica e a existência de um terceiro termo o mesmo pode ser considerado A e não A se encaixa muito bem para explicar o princípio da dualidade da luz*), e que realmente se encaixa muito bem a dualidade, quando aceita o axioma do terceiro incluído e os diferentes níveis de Realidade.

O **aluno B** respondeu que sim. Pois a lógica do terceiro incluído que é um dos pilares da Transdisciplinaridade é muito importante, por que o pensamento Aristotélico é muito limitado e não nos permite afirmar a dualidade, e já com o auxílio do terceiro incluído podemos dizer que uma coisa é A e não A ao mesmo tempo, ou seja, com isso podemos dizer que a luz pode ser onda e partícula.

Comentário da resposta do aluno B: O aluno percebeu que para compreender o Princípio da Dualidade da Luz é requerida uma lógica do terceiro incluído (*o pensamento Aristotélico é muito limitado e não nos permite afirmar a dualidade*). Salientou a limitação da lógica Aristotélica para compreensão do Princípio da Dualidade ([...] *já com o auxílio do terceiro incluído podemos dizer que uma coisa é A e não A ao mesmo tempo, ou seja, com isso podemos dizer que a luz pode ser onda e partícula*). Nesta etapa do Ciclo de Kelly pode-se observar que o aluno já apresenta reflexões de maneira coerente com aquilo que está sendo questionado.

O **aluno C** respondeu que sim. Pois no pensamento Transdisciplinar é considerado um elemento que é ao mesmo tempo A e não A, a lógica do terceiro incluído.

Comentário da resposta do aluno C: O aluno compreendeu que, por meio do pensamento Transdisciplinar, é possível aceitar uma nova lógica não Aristotélica, denominada de lógica do terceiro incluído (*Pois no pensamento Transdisciplinar é considerado um elemento que é ao mesmo tempo A e não A, a lógica do terceiro incluído*). Porém, pode-se observar na resposta do aluno que ele não fez uma reflexão maior sobre a relação entre a Transdisciplinaridade e o Princípio da Dualidade.

Analisando a etapa do investimento dos alunos A, B e C observamos que, com relação à 3ª questão: **A lógica do terceiro incluído é mais adequada que a lógica do terceiro excluído para compreensão do Princípio da Dualidade da Luz? Justifique sua resposta.**

O **aluno A** respondeu claro. A lógica do terceiro excluído onde prevalece os axiomas propostos por Aristóteles: o axioma da identidade: $A \text{ é } A$; o axioma da não contradição: $A \text{ não é } \text{Não } A$; o axioma do terceiro excluído: não existe um terceiro termo T (T de terceiro “incluído” que é ao mesmo tempo A e não A). Com base nesta lógica a luz nunca poderia ser considerada partícula e onda ao mesmo tempo; no mundo microscópico. Logo a lógica do terceiro excluído não se encaixa bem para explicar a dualidade da luz, como se encaixa a lógica do terceiro incluído.

O **aluno B** respondeu com certeza. A lógica do terceiro excluído não nos permite de jeito algum compreender o princípio da dualidade, ele afirma que não existe um T que possa ser A e não A. A lógica do terceiro incluído já me diz que existe um T que é A e não A, o que passa a ser uma base para a compreensão da dualidade da luz.

O **aluno C** respondeu que sim. Pois, ela admite a existência de um termo que ao mesmo tempo pode ser A e não A, que é o que acontece com a luz, ora ela apresenta um comportamento ondulatório e ora um comportamento discreto.

Comentários das respostas dos alunos A, B e C: Nas respostas dos alunos pode-se observar que todos eles compreenderam que a lógica do terceiro excluído não permite explicar adequadamente a dualidade onda-partícula e que o Princípio da Dualidade Luz “se encaixa” na lógica do terceiro incluído (*A lógica do terceiro excluído não nos permite de jeito algum compreender o princípio da dualidade, ele afirma que não existe um T que possa ser A e não A. A lógica do terceiro incluído já me diz que existe um T que é A e não A, o que passa a ser uma base para a compreensão da dualidade da luz*). Deduzimos que os alunos, após a leitura, entenderam o texto o que lhes permitiu fazer uma reflexão condizente com a pergunta.

6.3 Terceira etapa do Ciclo da Experiência (Encontro)

Conforme ressalta Kelly, na etapa de *encontro*, é o momento em que ocorre o evento, ou seja, o contato dos alunos com os três experimentos didáticos e da oficina Transdisciplinar, com o intuito de mostrar o comportamento ondulatório e corpuscular da luz e discutir a necessidade de uma lógica capaz de respaldar o Princípio da Dualidade da Luz.

Para tanto, foram trabalhados, nesta intervenção didática, os conceitos de difração, de interferência e de padrões de interferência e a quantização da luz. O nosso intuito, nessa etapa, é relacionar tais conceitos com o Princípio da Dualidade da Luz, através de uso de abordagem experimental observada durante a prática com uma cuba de onda; com a dupla fenda de Young; com o radiômetro de Crookes e a oficina Transdisciplinar. Nessa perspectiva, foi observado e registrado (por escrito) o relato dos alunos sobre a prática e anotados pelo pesquisador as observações, as percepções (expressas), indagações e questionamentos dos alunos no decurso dos experimentos.

6.3.1 Experimento 1: Cuba de onda ou tanque de onda

Um tanque de água rasa possui ondas geradas por dois martelinhos oscilantes que batem simultaneamente para cima e para baixo, gerando ondas planas na superfície de uma cuba de onda. Essas ondas se desviam na borda de obstáculo e produzem ondas semicirculares, quando passam por um orifício pequeno, confeccionado de papelão.

O principal objetivo desse experimento é analisar o comportamento ondulatório de uma onda mecânica em um tanque de água rasa e compreender os fenômenos de difração e de interferência que estão envolvidos no estudo do movimento ondulatórios. Diante disso, segue-se a análise dos alunos:

Para o **aluno A** o experimento realmente ajuda muito para o entendimento do fenômeno da difração e interferência para aqueles estudantes que irão estudar o movimento ondulatório, de ondas mecânicas pela primeira vez. Como eu já havia visto este tipo de experimento em vídeo, o resultado de alguma forma já estava na minha matriz de conhecimento. É claro que é mais interessante observar um experimento ao vivo, saber que é possível realizá-lo em sala de aula de forma tão “simples” e prática com a ajuda da cuba de onda. Participar deste tipo de experimento me ajudou a refletir o que realmente seria o fenômeno de difração e o de interferência, pois, quando começamos a realizar o experimento fiquei com

dúvida sobre o conceito de difração das ondas mecânicas. Esta dúvida com certeza vem do fato que a formação de licenciados em Física se processa de forma mais teórica do que de maneira mais prática (experimental). Logo a experimentação é algo muito importante na formação de Físicos.

Comentário do relato do aluno A: A finalidade do uso de uma abordagem experimental é promover, de forma sistemática, a elaboração de conceitos que estão envolvidos diretamente ao Princípio da Dualidade da Luz, conceitos esses como: difração e interferência, percebendo-se, no discurso do aluno A, “que é possível realizá-lo em sala de aula de forma tão “simples” e prática” (*É claro que é mais interessante observar um experimento ao vivo, saber que é possível realizá-lo em sala de aula de forma tão “simples” e prática com a ajuda da cuba de onda*). Ele compreendeu de maneira clara e objetiva a importância do uso da cuba de onda para construção de conceitos que estão relacionados ao movimento ondulatório (*Participar deste tipo de experimento me ajudou a refletir o que realmente seria o fenômeno de difração e o de interferência, pois, quando começamos a realizar o experimento fiquei com dúvida sobre o conceito de difração das ondas mecânicas*). De acordo com Moraes (2000), o ensino de Ciências leva em consideração a utilização de atividades experimentais, na sala de aula ou no laboratório, como essencial para a aprendizagem científica e, além disso, permite maior interação entre o professor e os alunos, proporcionando, em muitas ocasiões, a oportunidade de um planejamento de ações e o uso de estratégias de ensino que podem levar à melhor compreensão dos conceitos de Ciências.

O **aluno B** relatou que o experimento tornou claro o conhecimento de que uma onda pode difratar e o fenômeno de interferência, o conhecimento que eu tinha antes da aula era bastante teórico e com pouca aplicação no dia a dia; com o experimento ficou explícito que a difração ocorre a partir do momento em que a onda, tanto mecânica como eletromagnética, passa por um obstáculo e passa ter um comportamento circular, há uma formação de círculos. Pois se não houver a criação de círculos não há difração e, contudo a onda passa normalmente do mesmo modo que ela vinha antes do “obstáculo”. No caso da interferência, eu tinha a noção de que interferência seria o encontro de duas ondas, onde dependendo da forma como se encontrassem essas ondas teríamos interferência construtiva e destrutiva ou parcial. E o experimento mostrou as ondas após a difração existiam pontos onde não eram possíveis ver as ondas e outros onde era muito difícil observar qual era uma e qual era a outra onda num fenômeno de interferência totalmente destrutiva e construtiva respectivamente.

Comentário do relato do aluno B: No discurso do aluno, percebe-se que o uso da abordagem experimental da cuba de onda foi bastante satisfatório, à medida que permitiu, ao aluno, compreender a finalidade desse experimento de forma clara e objetiva como ele mesmo diz: o experimento tornou claro o conhecimento de que uma onda pode difratar e que compreendeu o fenômeno de interferência, e que antes da prática seu conhecimento era

bastante teórico e com pouca aplicação no dia a dia (*o experimento tornou claro o conhecimento de que uma onda pode difratar e o fenômeno de interferência, o conhecimento que eu tinha antes da aula era bastante teórico*). O experimento deixou explícito para ele que a difração ocorre a partir do momento em que a onda, tanto mecânica como eletromagnética, passa por um obstáculo (*o experimento ficou explícito que a difração ocorre a partir do momento em que a onda, tanto mecânica como eletromagnética, passa por um obstáculo*). Portanto, cumpriu o seu papel nessa construção de conhecimento. “[...] o indivíduo não é um mero produto do meio, nem um simples resultado de suas disposições interiores, mas uma construção própria que vai se produzindo dia a dia como resultado da interação entre esses dois fatores. Em consequência, segundo a posição construtivista, o conhecimento não é uma cópia da realidade, mas uma construção do ser humano” (CARRETERO apud MORAES, 2000).

O **aluno C** relatou que apenas tinha um conceito de difração em relação à luz. Na propagação da onda mecânica observei que uma onda pode gerar outra onda, que tem uma nova fonte para sua propagação, ou seja, adquiri um “novo” conceito de difração. No caso da interferência continuei com o mesmo conceito que tinha antes, ou seja, observei no experimento aquilo que já sabia sobre este fenômeno. No caso da difração foi difícil de observar devido ao conceito que tinha da difração na propagação da luz, mas, na onda mecânica observei que a difração pode se dar pela criação de novas fontes de ondas devido a propagação de uma ou mais ondas.

Comentário do relato do aluno C: Na fala do aluno pode-se notar que o experimento com a cuba de ondas lhe permitiu perceber que o fenômeno da difração ocorre não só com ondas eletromagnéticas, porém também com ondas mecânicas. Além disso, o experimento possibilitou ao aluno observar que a onda mecânica, ao passar por uma fenda, gera uma nova frente de onda (*apenas tinha um conceito de difração em relação à luz. Na propagação da onda mecânica observei que uma onda pode gerar outra onda, que tem uma nova fonte para sua propagação, ou seja, adquiri um “novo” conceito de difração*). O aluno se referiu a essa observação como “um novo conceito de difração”. A experiência vivenciada por ele com a cuba de ondas reforça a ideia de que toda observação e experimentação está impregnada de pressupostos teóricos (MORAES, 2000). No caso do aluno C, o pressuposto teórico dele é que somente ondas eletromagnéticas difratavam e a experiência da cuba de ondas permitiu a ampliação de sua visão sobre o fenômeno da difração (*No caso da difração foi difícil de observar devido ao conceito que tinha da difração na propagação da luz, mas, na onda mecânica observei que a difração pode se dar pela criação de novas fontes de ondas devido a propagação de uma ou mais ondas*). É interessante observar que somente ao perceber que ondas mecânicas difratam é que ele pôde realmente entender o fenômeno da difração. A

análise desse experimento reforça a ideia de que o conhecimento prévio determina a realidade, influenciando a observação, ou seja, que o conhecimento científico é uma construção humana que pretende descrever, compreender e agir sobre a realidade e não é considerada uma verdade definitiva, é provisório e sujeito a transformações (MORAES, 2000).

6.3.2 Experimento 2: Dupla fenda de Young

A experiência da dupla fenda consiste em deixar que a luz visível se difracte através de duas fendas, produzindo bandas numa tela. As bandas formadas, ou padrões de interferência, mostram regiões claras e escuras que correspondem aos pontos de interferências construtivas e destrutivas, respectivamente.

O principal objetivo desse experimento é analisar o comportamento ondulatório de uma onda luminosa (laser), compreendendo os fenômenos de difração e de interferência que estão envolvidos no estudo do movimento ondulatório. A análise dos relatos dos alunos sobre os experimentos é dada a seguir:

O **aluno A** relatou que o experimento ajudou bastante a perceber que tanto as ondas eletromagnéticas como as ondas mecânicas realmente têm os mesmos comportamentos em relação à difração e conseqüentemente a interferência. Mudei a minha concepção ao fato de achar que a presença de máximo e mínimo são conseqüências da formação dos cones e suas interseções, formando sombra e luminosidade.

Comentário do relato do aluno A: O experimento contribuiu, de forma clara e objetiva, para a construção de conceitos físicos vivenciados na experiência da dupla fenda de Young, possibilitando ao aluno A observar como as ondas eletromagnéticas têm o comportamento idêntico aos de onda mecânica (*o experimento ajudou bastante a perceber que tanto as ondas eletromagnéticas como as ondas mecânicas realmente têm os mesmos comportamentos em relação à difração e conseqüentemente a interferência*), apresentando os mesmos fenômenos da difração e da interferência já observados nas ondas mecânicas. Isso permitiu ao aluno A perceber que interferência e difração são fenômenos característicos das ondas e não uma propriedade específica da luz. A concepção de que as regiões de sombras e luminosidades são decorrentes de interferências construtivas e destrutivas (*Mudei a minha concepção ao fato de achar que a presença de máximo e mínimo são conseqüências da formação dos cones*

e suas interseções, formando sombra e luminosidade), também, foi uma grande contribuição que este experimento deu para ampliar a concepção do aluno sobre o conceito de franjas de interferências.

Em seu relato, o **aluno B** disse que o experimento me fez ver que a difração só ocorre quando a fenda no obstáculo é suficiente pequena a ponto de dificultar a passagem da onda eletromagnética, pois, quando aumentamos o tamanho da fenda o feixe passa sem sofrer nada. Ficou visível no experimento que quando temos duas fendas a interferência entre os feixes formados por cada fenda evidenciam bem mais esse fenômeno. Mais deu para ver os pontos de máximos e mínimos comprovando a interferência.

Comentário do relato do aluno B: Na fala do aluno, o experimento contribuiu de forma significativa para construção de seus conceitos sobre difração e interferência (*o experimento me fez ver que a difração só ocorre quando a fenda no obstáculo é suficiente pequena a ponto de dificultar a passagem da onda eletromagnética, pois, quando aumentamos o tamanho da fenda o feixe passa sem sofrer nada*), que são propriedades características do movimento ondulatório (*Mais deu para ver os pontos de máximos e mínimos comprovando a interferência*), e que era a finalidade desse experimento.

O **aluno C** relatou que o fenômeno da interferência acontece quando se utilizava duas fendas, porém com relação aos conceitos de difração e interferência, era do seu conhecimento que são propriedades características de um comportamento ondulatório. E, portanto, as ondas eletromagnéticas apresentavam este comportamento.

Comentário do relato do aluno C: O aluno reafirmou que o experimento retratou o que ele já sabia a respeito dos fenômenos de difração e de interferência (*conceitos de difração e interferência, era do seu conhecimento que são propriedades características de um comportamento ondulatório*), ou seja, que os fenômenos observados são propriedades características do movimento ondulatório (*E, portanto, as ondas eletromagnéticas apresentavam este comportamento*), possivelmente esse experimento não tenha trazido algo de novo, tendo em vista que o aluno já tinha compreendido esses fenômenos em sala de aula, com clareza.

6.3.3 Experimento 3: Radiômetro de Crookes ou moinho de luz

O experimento consiste em quatro hélices presas em braços que podem girar em torno de um ponto vertical com atrito muito pequeno. Todo o mecanismo é encapsulado em um invólucro de vidro, do qual o ar é parcialmente evacuado por uma bomba. As hélices têm tons claros (prateado) e escuros (preto) dispostas alternadamente. Elas começam a girar, enquanto a luz de qualquer natureza (solar, artificial ou até mesmo radiação infravermelha produzida pelo calor da mão) incide em sua superfície.

O principal objetivo desse experimento é analisar o efeito de colisões de quanta de luz, produzidas por meio do radiômetro de pressão, entender o momento linear e explicar o funcionamento do moinho de luz. Diante disso, segue-se a análise dos alunos:

O **aluno A** relatou que quando a luz incide no lado escuro das palhetas os quanta de luz são absorvidos e neste momento os quanta funcionam como partículas gerando uma força contra as palhetas. Como estas estão dentro de um bulbo de vidro onde ar dentro do mesmo está rarefeito formando um “quase vácuo” e o atrito entre o suporte das palhetas é mínimo, possibilitando o giro das palhetas. Já no outro lado das palhetas a mais clara os quanta não serão absorvidos, logo, não ocorrerá o fenômeno como antes.

O **aluno B** relatou que os movimentos das hélices, giram quando uma fonte de luz “policromática” incide sobre a paleta, essa fonte emite fótons que ao incidirem contra a hélice, no lado preto, fazem à mesma rotacionar. Já com a mesma fonte de luz incidindo do lado prateado ele não rotaciona, pois os fótons são desviados pela superfície espelhada ou branca, antes que a luz incida sobre a hélice.

O **aluno C** relatou que a luz ao bater nas pás provoca um deslocamento, isto se deve ao fato de que um lado das pás é refletor. Assim, quando a luz bater neste lado é refletida e devido à energia da onda eletromagnética (a luz) é causado um deslocamento. Observei que o outro lado da pá é opaco, pois quando a luz incide sobre este lado as pás quase que não se movimentam, apesar de absorverem a energia da luz. Mas, parece que o movimento das pás é devido ao fato de que a luz é refletida em um dos lados das pás. Então, ao refletir a luz das pás entram em movimento.

Comentários dos relatos dos alunos A, B e C: Os alunos ficaram impressionados ao verem, pela primeira vez, o funcionamento do moinho de luz. Fato este que não possibilitou para que eles levantassem suas hipóteses a respeito do que realmente provocaria o seu funcionamento. Só depois de o pesquisador levantar algumas possibilidades sobre o seu funcionamento é que os alunos propuseram algumas hipóteses sobre o real motivo de rotação das hélices. A

dificuldade para compreensão do experimento do moinho de luz é que ele é constituído por um conjunto de conceitos mais aprofundados de princípios da Física e que os licenciandos ainda não se apropriaram adequadamente. Mesmo assim, o experimento contribuiu para que os alunos compreendessem que o momento linear e a pressão da radiação estão envolvidos no funcionamento do moinho de luz.

6.3.4 Abordagem 4: Oficina Transdisciplinar

A oficina Transdisciplinar foi iniciada com uma palestra a respeito do Pensamento Transdisciplinar. Abordando questões como: a disciplinaridade, Transdisciplinaridade e seus pilares, operadores de ligação do pensamento complexo (a ideia de emergência; a ideia de circularidade; o operador hologramático e operador dialógico), como também os axiomas da lógica clássica. Em seguida, foi promovido um debate sobre o tema abordado, mediado pelo pesquisador. Ao término da oficina foi apresentado, para o grupo de alunos, um software conhecido como “wave-interference”, que apresenta o comportamento ondulatório para uma onda luminosa e mecânica, descrevendo os fenômenos da difração e da interferência e um vídeo do youtube – “Dr. Quantum” que apresenta o fenômeno da difração e da interferência para elétrons (partículas), ao passarem pela dupla fenda de Young, o que demonstra o comportamento ondulatório dos elétrons.

Objetivo principal dessa oficina Transdisciplinar foi discutir as bases do pensamento Transdisciplinar e seus pilares na possibilidade de contribuir para a compreensão do Princípio da Dualidade da Luz. Diante do exposto segue-se a análise dos alunos:

O **aluno A** relatou que o pensamento Transdisciplinar através da lógica do terceiro incluído contribuiu para o entendimento do Princípio da Dualidade da Luz. Além disso, nesta oficina foi discutida a fragmentação dos conteúdos ministrados na graduação do curso de Licenciatura em Física, que não permite ao estudante relacionar os conteúdos ministrados nas diferentes disciplinas.

O **aluno B** explanou que a oficina permitiu que ele percebesse que o pensamento aristotélico não conduz a compreensão do Princípio da Dualidade da Luz, enquanto o Pensamento Transdisciplinar, introduzindo uma nova lógica (terceiro incluído) e os níveis de Realidade possibilita uma real compreensão desse Princípio.

Para o **aluno C** a discussão realizada na oficina foi fundamental para que percebesse as bases do pensamento Transdisciplinar como os níveis de realidade, a lógica do terceiro incluído e a complexidade – que determinam a metodologia da pesquisa Transdisciplinar.

Comentários dos relatos dos alunos A, B e C: Foi interessante observar que, apesar dos alunos terem suas formações baseadas nos três postulados metodológicos da Ciência (1º. A existência de leis universais de caráter matemático; 2º. A descoberta destas três leis pela experiência científica; 3º. A reprodutibilidade perfeita dos dados experimentais) foram capazes de perceber com clareza a necessidade de uma nova visão epistemológica, que é o Pensamento Transdisciplinar, para compreender o fenômeno da dualidade onda-partícula, permitindo que eles ampliassem seus conhecimentos.

6.4 Quarta etapa do Ciclo da Experiência (Confirmação ou Desconfirmação)

Conforme enfatiza Kelly, nesta etapa de *confirmação ou desconfirmação*, é o momento em que o aluno testa suas hipóteses, confirmando-as ou desconfirmando-as a respeito do que previu sobre o assunto em questão. Nessa etapa, os alunos irão relatar suas experiências, após confrontar com os experimentos didáticos, incluindo a oficina, confirmando ou refutando suas hipóteses a respeito do Princípio da Dualidade da Luz.

De acordo com as experiências, foram feitas as análises:

O **aluno A** relatou desconhecer o experimento cuba de onda, e que a experiência didática realizada desconfirmou a sua hipótese de que a onda mecânica, ao passar por uma fenda simples ou dupla, passaria de forma plana e não semicircular. O experimento permitiu-lhe observar que a onda, ao passar numa fenda, se propaga de forma semicircular. É interessante notar que a compreensão da propagação de ondas através de uma fenda é básica para a compreensão do conceito de difração. Com relação ao experimento da dupla fenda de Young, era um experimento conhecido por ele, não trazendo muita contribuição, fato este que apenas confirmou a sua hipótese sobre essa experiência. Com relação ao experimento radiômetro de Crookes, desconhecido por ele, o experimento e seu funcionamento, foram feitas, várias especulações sobre qual seria o motivo real de as hélices girarem no interior do bulbo, se esse fenômeno estaria relacionado à temperatura ou se era provocado pelas ondas luminosas ou colisões de quanta de luz. Após ouvir as possíveis explicações sobre o fenômeno, o aluno desconfirmou sua hipótese sobre o respectivo fenômeno. Com relação à oficina Transdisciplinar foram discutidos aspectos importantes, como a complexidade, a lógica do terceiro incluído e os níveis de Realidade, questões necessárias para compreender o Princípio

da Dualidade da Luz. A oficina sobre Transdisciplinaridade confirmou a hipótese dele sobre a necessidade de uma nova lógica para respaldar o Princípio da Dualidade.

O **aluno B** explicou que desconhecia o experimento cuba de onda, desconfirmou sua hipótese sobre o conceito de difração. Semelhante ao aluno A, ele também pensava que a onda mecânica, ao passar por uma fenda simples ou dupla, passaria de forma plana e não semicircular. O experimento permitiu que ele observasse que a onda ao atravessar uma fenda se propaga de forma semicircular, que é um fato fundamental no fenômeno da difração. O experimento da dupla fenda não trouxe contribuição, apenas confirmou sua hipótese sobre os fenômenos de difração e de interferência que são característicos de movimento ondulatório. O mesmo aluno B relatou que não conhecia o experimento radiômetro de Crookes, porém tentou descrever o seu funcionamento com base no comportamento dual da luz, no entanto suas hipóteses não justificam adequadamente o funcionamento do moinho de luz. A oficina sobre Transdisciplinaridade confirmou a hipótese levantada por de haver necessidade de uma nova lógica para corroborar a dualidade da onda-partícula.

O **aluno C** relatou que não conhecia o experimento cuba de onda e, semelhante aos outros dois alunos, também pensava que a onda mecânica, ao passar por uma fenda simples ou dupla, passaria de forma plana e não semicircular. O experimento forneceu-lhe condições de observar que a onda, ao atravessar uma fenda, se propaga de forma semicircular, fato fundamental para o fenômeno da difração. Portanto, a experiência da cuba de onda desconfirmou sua hipótese sobre a o referido fenômeno. Por sua vez, o experimento dupla fenda de Young confirmou sua hipótese sobre difração e interferência. O aluno relatou não conhecer o experimento radiômetro de Crookes, que desconfirmou sua hipótese, ao tentar descrever o fenômeno observado, fazendo associações da luz enquanto onda e, posteriormente, como uma partícula, não citando a ideia da radiação de pressão nem do momento linear. Durante a oficina Transdisciplinar, foram discutidos aspectos importantes que lhe permitiram confirmar sua hipótese sobre o Pensamento Transdisciplinar e seus pilares, que é um pensamento importante para a compreensão da dualidade da luz.

6.5 Quinta etapa do Ciclo da Experiência (Revisão Construtiva)

No dizer de Kelly, nessa etapa de *revisão construtiva*, é o momento em que o aluno se coloca a pensar em toda a situação e, se for o caso, ampliar o limite de validade de sua hipótese inicial e, desta maneira, tirar as suas conclusões sobre o Princípio da Dualidade da Luz. Para essa etapa, foi aplicado o mesmo questionário aberto composto de quatro perguntas, com toda a turma a respeito do Pensamento Transdisciplinar e de seus pilares, com o propósito de verificar a evolução conceitual e investigar se o Pensamento Transdisciplinar poderá contribuir para a compreensão do Princípio da Dualidade da Luz e da lógica que respalda tal Princípio.

A 1ª questão que visa estabelecer o conhecimento prévio dos estudantes sobre o Princípio da Dualidade da Luz foi a seguinte: **O que caracteriza o Princípio da Dualidade da Luz?**

O **aluno A** respondeu que a principal característica desse princípio é o fato da existência de um sistema complexo, não aristotélico, onde existem vários níveis de Realidade, onde a luz pode se comportar de formas diferentes, ela pode ser luz, como também pode ser partícula. Esta é a lógica do terceiro incluído.

Comentário da resposta do aluno A: Na resposta do aluno, percebe-se que, apesar de ele ter discorrido sobre as bases do Pensamento Transdisciplinar (*que a principal característica desse princípio é o fato da existência de um sistema complexo, não aristotélico, onde existem vários níveis de Realidades, onde a luz pode se comportar de formas diferentes ela pode ser luz, como também pode ser partícula. Esta é a lógica do terceiro incluído*), não conseguiu fazer uma associação entre a Transdisciplinaridade e o Princípio da Dualidade da Luz, faltando-lhe dessa maneira uma reflexão mais ampla daí sua dificuldade em responder o questionamento.

O **aluno B** disse que o Princípio da dualidade é caracterizado pelo fato de que a luz pode se comportar como onda, apresentando efeito de difração e de interferência, e como partícula, onde a luz emite fótons (partícula) como foi observado no experimento radiômetro de Crookes.

Comentário da resposta do aluno B: Na resposta do aluno, percebe-se que ele consegue fazer relação com clareza dos fenômenos da difração e de interferência com o experimento da cuba de onda e da dupla fenda de Young e do experimento radiômetro de Crookes com o comportamento da luz, enquanto partícula (*que o Princípio da dualidade é caracterizado pelo fato de que a luz pode se comportar como onda, apresentando efeito de difração e de*

interferência, e como partícula, onde a luz emite fótons). Observa-se que houve uma mudança significativa no discurso apresentado pelo aluno após as intervenções didáticas dos três experimentos, que por certo, ajudaram-no construir, com clareza, esses conceitos.

O **aluno C** respondeu o fato que a luz apresenta um comportamento ondulatório, ou seja, a luz possui características ondulatórias e ao mesmo tempo a luz apresenta-se de maneira corpuscular, ou seja, descontínua, a luz ora se comporta como onda ora como partícula.

Comentário da resposta do aluno C: Na resposta do aluno, há o reconhecimento de que a luz apresenta característica ondulatória e corpuscular, porém não faz nenhuma associação com os experimentos realizados (*o fato que a luz apresenta um comportamento ondulatório, ou seja, a luz possui características ondulatórias e ao mesmo tempo a luz apresenta-se de maneira corpuscular, a luz ora se comporta como onda ora como partícula*), fugindo da questão formulada devido à ausência de uma melhor reflexão.

A 2ª questão do questionário, assim formulada “**Pensar que a luz pode comportar-se de forma dual é razoável? Justifique sua resposta**”, visa investigar como os alunos pensam a questão da dualidade onda-partícula do ponto de vista lógico.

O **aluno A** respondeu que sim. Pois, com as novas ideias da Física quântica, percebeu-se que a realidade tem níveis, é justamente neste aspecto onde o comportamento da luz se apoia. Numa realidade macroscópica a luz pode se comportar como onda; Já numa realidade microscópica ela também pode comporta-se como onda, mas também existirá a possibilidade de comporta-se como partícula. Esta nova visão sobre a realidade afasta-se da visão mecanicista (aristotélica), indo para uma nova visão de enxergar o mundo.

Comentário da resposta do aluno A: Na resposta do aluno, houve modificação de sua concepção por apropriar-se do Pensamento Transdisciplinar (*percebeu-se que a realidade tem níveis, é justamente neste aspecto onde o comportamento da luz se apoia*), interagindo com o Princípio da Dualidade da Luz (*Numa realidade macroscópica a luz pode se comportar como onda; Já numa realidade microscópica ela também pode comporta-se como onda, mas também existirá a possibilidade de comporta-se como partícula*), no entanto não percebeu a possibilidade da existência de uma lógica advinda do Princípio da Dualidade (*Esta nova visão sobre a realidade afasta-se da visão mecanicista (aristotélica), indo para uma nova visão de enxergar o mundo*). As leituras e as discussões o levaram à fundamentação de sua resposta.

O **aluno B** disse sim. Pois como dito acima a luz quando incide sobre um obstáculo, ela “se curva” para ultrapassá-lo surgindo aí uma característica de onda a difração. E ao observar um anteparo vemos que existem pontos de máximos e mínimos que é características de onda também, a interferência, e vimos que ela também se comporta como partícula, que faz mover as pás do radiômetro de Crookes.

Comentário da resposta do aluno B: Na resposta o aluno, conseguiu definir os fenômenos da difração e da interferência que são características de movimento ondulatório (*a luz quando incide sobre um obstáculo, ela “se curva” para ultrapassá-lo surgindo aí uma característica de onda a difração*), após ter vivenciado a abordagem experimental e que os pontos de máximos e de mínimos caracterizam o fenômeno de interferência construtiva e destrutiva (*observar um anteparo vemos que existem pontos de máximos e mínimos que é características de onda também, a interferência, e vimos que ela também se comporta como partícula, que faz mover as pás do radiômetro de Crookes*). Porém não demonstrou em sua resposta ter percebido a existência de uma lógica que respalde a dualidade da luz.

O **aluno C** respondeu que segundo a lógica aristotélica, não. Mas, segundo a lógica do terceiro incluído, sim. Pois segundo esta lógica um elemento A pode ser ao mesmo tempo A e não A, ou seja, a luz pode ser onda e ao mesmo tempo partícula. E na lógica do terceiro incluído não é contraditória afirmar que um elemento A pode ser também um elemento não A.

Comentário da resposta do aluno C: Na resposta do aluno, o mesmo apresentou mudanças significativas com relação ao uso de lógica, quando ele fez uso de uma lógica mais complexa para respaldar o Princípio da Dualidade da Luz (*segundo a lógica do terceiro incluído, sim. Pois segundo esta lógica um elemento A pode ser ao mesmo tempo A e não A, ou seja, a luz pode ser onda e ao mesmo tempo partícula*), utilizando um dos pilares da Transdisciplinaridade, que é a lógica do terceiro incluído para justificar a sua resposta (*na lógica do terceiro incluído não é contraditória afirmar que um elemento A pode ser também um elemento não A*). Assim, as leituras o fizeram ampliar a compreensão a respeito da dualidade.

A 3ª questão tem como propósito saber se a lógica Aristotélica, que é uma lógica do terceiro excluído, consegue respaldar através de seus axiomas o Princípio da Dualidade da Luz. A questão foi formulada como segue: **A partir da lógica Aristotélica, que se baseia nos seguintes axiomas: 1. O axioma da identidade: A é A (Ferro é Ferro); 2. axioma da não-contradição: A não é não A (Madeira não é Ferro); 3. O axioma do terceiro excluído: não existe um terceiro termo T, que ao mesmo tempo seja A e não A (não existe nada**

que seja Madeira e Ferro). Esta lógica pode ser aplicada ao Princípio da Dualidade da Luz? Justifique sua resposta.

O **aluno A** respondeu que não. Esta visão do terceiro excluído nunca poderia ser aplicado ao Princípio da Dualidade da Luz, pois, a luz hora se comporta como onda, hora como partícula (hora é A e hora é não A). Logo não cabe no Princípio da Dualidade da Luz esta visão aristotélica. O que poderia justificar estas novas ideias seria a lógica do terceiro incluído.

Comentário da resposta do aluno A: Na resposta desse aluno pode-se notar que ele se apropriou da lógica do terceiro incluído, reconhecendo que a lógica do terceiro excluído não consegue respaldar a dualidade da luz (*Esta visão do terceiro excluído nunca poderia ser aplicado ao Princípio da Dualidade da Luz, pois, a luz hora se comporta como onda, hora como partícula (hora é A e hora é não A). Logo não cabe no Princípio da Dualidade da Luz esta visão aristotélica. O que poderia justificar estas novas ideias seria a lógica do terceiro incluído*). As discussões e as leituras o levaram a uma melhor reflexão.

O **aluno B** respondeu que não. Pois, o Princípio da Dualidade da Luz se baseia exatamente no contrário, ou seja, existe sim uma coisa que pode ser A e não A, que pode ser onda e partícula, no caso a luz. Dependendo de como eu quero lhe observar ela será onda ou partícula, pois ela apresenta comportamento de ambas às coisas.

Comentário da resposta do aluno B: Em sua resposta, observa-se que ele compreendeu que a lógica do terceiro excluído não consegue responder à dualidade da luz e que somente uma lógica complexa (*o Princípio da Dualidade da Luz se baseia exatamente no contrário, ou seja, existe sim uma coisa que pode ser A e não A, que pode ser onda e partícula, no caso a luz*), que é a lógica do terceiro incluído (A, não A e T) é coerente com o Princípio da Dualidade da Luz (*Dependendo de como eu quero lhe observar ela será onda ou partícula, pois ela apresenta comportamento de ambas às coisas*). Percebe-se pela resposta do aluno que as discussões e as leituras o favoreceram o entendimento do questionamento.

O **aluno C** respondeu que não. Pois a luz se comportaria segundo este axioma de maneira contraditória, ou seja, segundo a lógica aristotélica, a luz não pode ser partícula e ao mesmo tempo onda. Pois, o terceiro axioma aristotélico que é o axioma do terceiro excluído, afirma que um determinado elemento não pode ser A e ao mesmo tempo não A.

Comentário da resposta do aluno C: O aluno reconheceu que a lógica do terceiro excluído, que é a lógica Aristotélica, não consegue responder ao Princípio da Dualidade da Luz (*Pois a luz se comportaria segundo este axioma de maneira contraditória, ou seja, segundo a lógica*

aristotélica, a luz não pode ser partícula e ao mesmo tempo onda), pois, após as leituras e discussões foi possível chegar a uma conclusão lógica.

A 4ª questão tem como propósito saber se a lógica do terceiro incluído que é uma lógica mais complexa permite compreender o Princípio da Dualidade da Luz. Esta questão foi assim formulada: **A natureza pode ser regida por uma lógica complexa não-aristotélica que leva em consideração diferentes níveis de Realidade, de maneira que exista um terceiro termo T sendo ao mesmo tempo A e não A. Uma lógica desse tipo poderia ser aplicada ao Princípio da Dualidade da Luz? Justifique sua resposta.**

O **aluno A** respondeu que sim. Esta nova lógica do terceiro incluído se encaixa muito bem ao Princípio da Dualidade da Luz. Pois A é A, e A pode ser não A, como acontece com a luz, hora é onda (A) e em outro momento é não A (partícula).

Comentário da resposta do aluno A: Em sua resposta fica evidente que o estudante compreendeu que somente uma lógica mais complexa pode respaldar logicamente a dualidade onda-partícula (*Esta nova lógica do terceiro incluído se encaixa muito bem ao Princípio da Dualidade da Luz*), tal como aquela do terceiro incluído (A, não A e T) (*Pois A é A, e A pode ser não A, como acontece com a luz, hora é onda “A” e em outro momento é não A “partícula”*). Observamos que as atividades realizadas durante o Ciclo da Experiência permitiram a sua reflexão sobre lógica.

O **aluno B** respondeu sim. Essa lógica rege o “mundo natural” em certos níveis de Realidade, e é exatamente a essência do Princípio da Dualidade da Luz, pois ela é onda e também partícula.

Comentário da resposta do aluno B: O aluno conseguiu compreender que, só através de uma lógica complexa e com seus diferentes níveis de Realidade, é que podemos entender a natureza dual da luz (*Essa lógica rege o “mundo natural” em certos níveis de Realidade, e é exatamente a essência do Princípio da Dualidade da Luz*). Desta maneira, o Ciclo da Experiência contribuiu para sua compreensão sobre a lógica do terceiro incluído.

O **aluno C** respondeu sim. Esta lógica dá fundamento para o fato de que a luz se comporta ora como onda e ora como partícula, ou seja, não seria contraditório dizer que a luz é onda e ao mesmo tempo é partícula, pois existe um terceiro termo (T) sendo ao mesmo tempo A e não A.

Comentário da resposta do aluno C: O aluno conseguiu entender, após ter realizado o Ciclo da Experiência de Kelly, que o Princípio da Dualidade da Luz requer a compreensão de uma nova lógica (*Esta lógica dá fundamento para o fato de que a luz se comporta ora como onda e ora como partícula, ou seja, não seria contraditório dizer que a luz é onda e ao mesmo tempo é partícula*), a terceiro incluído (A, não A e T), para um real entendimento do referido Princípio.

6.6 Análise comparativa da evolução conceitual a respeito do Princípio da Dualidade da Luz

Esta etapa tem o propósito de comparar as concepções dos alunos antes (*antecipação*) e após (*revisão construtiva*) a realização do Ciclo da Experiência de Kelly.

Quadro Comparativo nº 1

01. O que caracteriza o Princípio da Dualidade da Luz?		
Respostas dos Alunos:	Etapa da antecipação (1º questionário)	Etapa da revisão construtiva (2º questionário)
A	<p><i>Esta dúvida em relação à natureza da luz se dá porque hora se comporta como onda e hora se comporta como se fosse matéria. Este fenômeno que descreve sobre a luz, vem sendo estudado há vários anos pelos maiores Físicos tais como: Maxwell, Lorentz, Newton, Einstein. Com a realização de alguns experimentos no início do século a Ciência começou a observar que a luz apresentava propriedades, isto é, ficou caracterizado pelo experimento de dupla fenda, onde constataram o fenômeno de interferência, logo a luz poderia ser considerada uma onda, mas incrivelmente os cientistas observaram também que quando colocado um “sensor” para determinar por onde passava a luz nas duas fendas a luz passava a se comportar como partículas. Era o</i></p>	<p><i>A principal característica desse princípio é o fato dele não obedecer a uma lógica não aristotélica, onde existem vários níveis de Realidade, onde a luz pode se comportar de formas diferentes, ela pode ser onda, como também pode ser partícula. Esta é a lógica do terceiro incluído.</i></p>

	<i>que se apresentava no anteparo colocado através das fendas.</i>	
B	<i>É o fato de que a luz pode ser considerada tanto onda como partícula.</i>	<i>O Princípio da dualidade é caracterizado pelo fato de que a luz pode se comportar como onda, apresentando efeito de difração e de interferência, e como partícula, onde a luz emite fótons (partícula) como foi observado no experimento radiômetro de Crookes.</i>
C	<i>É o fato de a luz ter um comportamento de onda e partícula, ou seja, além das propriedades ondulatórias, a luz se comporta de maneira discreta, pois sua energia é quantizada.</i>	<i>O fato que a luz apresenta um comportamento ondulatório, ou seja, a luz possui características ondulatórias e ao mesmo tempo a luz apresenta-se de maneira corpuscular, ou seja, descontínua, a luz ora se comporta como onda ora como partícula.</i>

Na sua resposta, o **aluno A**, na etapa da *antecipação*, relatou a importância de vários cientistas no desenvolvimento das ideias que levaram à dualidade e descreveu o experimento da dupla fenda de Young com o objetivo de mostrar o comportamento ondulatório da luz. Cita equivocadamente que a experiência de Young, também podia mostrar o caráter corpuscular da luz, tendo em vista, que relatou já ter assistido ao vídeo “Dr. Quantum”, fazendo a confusão com a representação de feixe de elétrons, com onda luminosa. Portanto, o aluno centrou sua resposta prévia em experiências físicas, como é esperado nos períodos finais do curso de Física. Na etapa da *revisão construtiva*, ou seja, após vivenciar o Ciclo da Experiência de Kelly, o aluno A focou sua resposta em aspectos da Transdisciplinaridade, apesar de não ter respondido adequadamente à pergunta.

Na resposta do **aluno B**, durante a *antecipação*, percebe-se ter sido ele objetivo ao caracterizar a dualidade da luz. Já, após a vivência do Ciclo da Experiência, na *revisão construtiva*, demonstrou que, na etapa do *encontro*, os experimentos didáticos a cuba de onda, a dupla fenda de Young e o radiômetro de Crookes lhe permitiram apropriar-se de conceitos físicos que foram importantes para a construção do conceito que envolve o Princípio da

Dualidade. Fato este que o permitiu realizar relações entre os conceitos discutidos nos dois primeiros experimentos didáticos que estão relacionados ao movimento ondulatório, em particular, aos fenômenos da difração e da interferência e o terceiro experimento apresenta a teoria corpuscular da luz, quando associou fótons ao moinho de luz.

O **aluno C**, tanto na *antecipação*, como na *revisão construtiva*, manteve a mesma ideia, não se aprofundando em sua resposta e nem fazendo referência às questões debatidas durante a vivência do Ciclo da Experiência de Kelly. Permaneceu com um discurso objetivo, direto, não agregando na conceituação do Princípio da Dualidade as novas aprendizagens adquiridas durante o Ciclo de Kelly.

Quadro Comparativo nº 2

02. Pensar que a luz pode comportar-se de forma dual é razoável? Justifique sua resposta.		
Respostas dos Alunos:	Etapa da antecipação (1º questionário)	Etapa da revisão construtiva (2º questionário)
A	<i>Sim. Que com a chegada da Física Moderna, onde se estuda objetos com dimensões atômicas e também com altas velocidades. Nesta área se comprovou através de experimentos (indutivismo ingênuo) que a luz realmente se comporta hora como luz, hora como partícula.</i>	<i>Sim. Pois, com as novas ideias da Física quântica, percebeu-se que a realidade tem níveis, é justamente neste aspecto onde o comportamento da luz se apóia. Numa realidade macroscópica a luz pode se comportar como onda; Já numa realidade microscópica ela também pode comporta-se como onda, mas também existirá a possibilidade de comporta-se como partícula. Esta nova visão sobre a realidade afasta-se da visão mecanicista (aristotélica), indo para uma nova visão de enxergar o mundo.</i>
B	<i>Sim. Que se tomarmos a luz como uma onda, ou seja, essa onda possui características e propriedades ondulatórias e se admitirmos que ao mesmo tempo ela é formada por quantas de luz, quer dizer, como sendo discreta. Então o fato dela se comportar de maneira dual é razoável. Pois, estaríamos nos baseando nessa teoria, a dos quantas de luz (energia quantizada).</i>	<i>Sim. Pois como dito acima a luz quando incide sobre um obstáculo, ela “se curva” para ultrapassá-lo surgindo aí uma característica de onda a difração. E ao observar um anteparo vemos que existem pontos de máximos e mínimos que é características de onda também, a interferência, e vimos que ela também se comporta como partícula, que faz mover as pás do radiômetro de Crookes.</i>
	<i>Sim. Se tomarmos a luz com características e propriedades ondulatórias e se admitimos que ela</i>	<i>Segundo a lógica aristotélica não. Mas, segundo a lógica do terceiro incluído sim. Pois segundo está lógica um elemento A</i>

C	<p><i>fosse formada por quantas de luz, quer dizer, como sendo discreta. Então o fato dela se comportar de maneira dual é razoável.</i></p>	<p><i>pode ser ao mesmo tempo A e não A, ou seja, a luz pode ser onda e ao mesmo tempo partícula. E na lógica do terceiro incluído não é contraditória afirmar que um elemento A pode ser também um elemento não A.</i></p>
----------	---	---

O **aluno A** apresenta um discurso mais consistente, após a vivência do Ciclo da Experiência de Kelly, pois, comparando sua resposta da etapa da *antecipação* com a da *revisão construtiva*, observamos que ele propõe rompimento de paradigma, a lógica Aristotélica por uma nova lógica, fazendo relação com um dos pilares da Transdisciplinaridade, os diferentes níveis de Realidade para responder à questão.

Com relação ao **aluno B**, na etapa da *antecipação*, ele fundamenta sua resposta apoiada na teoria, para depois se apoiar na experimentação, enquanto estudante de Licenciatura em Física. Na *revisão construtiva*, fundamenta sua resposta a partir dos experimentos vivenciados durante a etapa do *encontro*. Podemos observar que, nesta questão, este aluno não fez referência aos pilares da Transdisciplinaridade, nem mesmo à lógica que respalda tal Princípio.

O **aluno C**, na etapa da *antecipação* apresentou uma resposta evasiva, sem maiores aprofundamentos. Porém, na *revisão construtiva*, houve uma significativa mudança, pois ele se apropriou dos pilares da Transdisciplinaridade, dos diferentes níveis de Realidade e lógica do terceiro incluído para fundamentar sua resposta, reconhecendo a existência de uma lógica que fundamenta a dualidade da luz.

Quadro Comparativo nº 3

03. A partir da lógica Aristotélica, que se baseia nos seguintes axiomas: 1. O axioma da identidade: A é A (Ferro é Ferro); 2. O axioma da não-contradição: A não é não A (Madeira não é Ferro); 3. O axioma do terceiro excluído: não existe um terceiro termo T, que ao mesmo tempo seja A e não A (não existe nada que seja Madeira e Ferro). Esta lógica pode ser aplicada ao Princípio da Dualidade da Luz? Justifique sua resposta.		
Respostas dos Alunos:	Etapa da antecipação (1º questionário)	Etapa da revisão construtiva (2º questionário)
A	<i>Não. Esta visão Aristotélica se aplica muito bem ao Mecanismo Newtoniano da lei Física que perduraram vários séculos. Mas com a chegada da eletrodinâmica de Maxwell, a teoria eletrônica de Lorentz, a troca da relatividade o que antes era considerado absoluto como o tempo o espaço, agora já não mais o era o tempo, o espaço tornaram-se relativo.</i>	<i>Não. Esta visão do terceiro excluído nunca poderia ser aplicado ao Princípio da Dualidade da Luz, pois, a luz hora se comporta como onda, hora como partícula (hora é A e hora é não A). Logo não cabe no Princípio da Dualidade da Luz esta visão aristotélica. O que poderia justificar estas novas ideias seria a lógica do terceiro incluído.</i>
B	<i>Não. Pois o Princípio da Dualidade fala exatamente o inverso. Se seguisse esta lógica então a luz sendo uma onda não poderia ser também uma partícula e vice-versa.</i>	<i>Não. Pois, o Princípio da Dualidade da Luz se baseia exatamente no contrario, ou seja, existe sim uma coisa que pode ser A e não A, que pode ser onda e partícula, no caso a luz. Dependendo de como eu quero lhe observar ela será onda ou partícula, pois ela apresenta comportamento de ambas às coisas.</i>
C	<i>Não. Pois se não existe um termo que ao mesmo tempo seja A e não A então a dualidade da luz seria uma ideia falsa. Por isso, para admitir o Princípio da Dualidade da Luz,</i>	<i>Não. Pois a luz se comportaria segundo este axioma de maneira contraditória, ou seja, segundo a lógica aristotélica, a luz não pode ser partícula e ao mesmo tempo onda. Pois, o terceiro axioma aristotélico</i>

	<i>teremos que abandonar esta lógica aristotélica para o caso da luz.</i>	<i>que é o axioma do terceiro excluído, afirma que um determinado elemento não pode ser A e ao mesmo tempo não A.</i>
--	---	---

A resposta do **aluno A**, na etapa de *antecipação*, faz referência aos conteúdos aprendidos no seu curso de Física. Na *revisão construtiva*, mais uma vez observamos sua apropriação de conceitos referentes à Transdisciplinaridade, pois faz uso deles para justificar sua resposta.

O **Aluno B**, na etapa de *antecipação*, responde de forma objetiva, mas, pensando ainda de maneira conservadora. Na *revisão construtiva*, sua resposta é bem elaborada e baseada em princípios da Transdisciplinaridade, demonstrando uma posição crítica, reflexiva, com relação ao Princípio da Dualidade da Luz.

O **Aluno C**, desde a etapa de *antecipação*, já faz uma reflexão aprofundada sobre a lógica Aristotélica e a necessidade de abandoná-la para ser possível compreender o Princípio da Dualidade. Na *revisão construtiva*, ele responde mais uma vez de forma bem elaborada e com clareza, baseando-se na lógica na inadequação da lógica Aristotélica. O aluno parte do Princípio de que a dualidade é “verdadeira” e como tal, a lógica Aristotélica é inadequada.

Quadro Comparativo nº 4

04. A natureza pode ser regida por uma lógica complexa não Aristotélica que leva em consideração diferentes níveis de Realidade, de maneira que exista um terceiro termo T sendo ao mesmo tempo A e não A. Uma lógica desse tipo poderia ser aplicada ao Princípio da Dualidade da Luz? Justifique sua resposta.		
Respostas dos Alunos:	Etapa da antecipação (1º questionário)	Etapa da revisão construtiva (2º questionário)
A	<i>Sim. Com as ideias inovadoras de Einstein sobre os fenômenos Físicos, com a criação da teoria da relatividade restrita e geral, os físicos começaram a ter uma visão não mais mecanicista, deixando de lado o indutivismo. Podendo desta forma fazer especulações, criações livre que poderão num futuro mais próximo serem comprovadas através de experimentos práticos. Inclusive esta nova lógica de existir um terceiro termo T sendo ao mesmo tempo A e não A.</i>	<i>Sim. Esta nova lógica do terceiro incluído se encaixa muito bem ao Princípio da Dualidade da Luz. Pois A é A, e A pode ser não A, como acontece com a luz, hora é onda (A) e em outro momento é não A (partícula).</i>
B	<i>Sim. A natureza é composta de várias partículas (moléculas) que interagem entre si formando novas partículas, e essas novas partículas podem ter características das duas moléculas que se interagem. A luz no caso depende da maneira que queremos tratá-la pode ser onda e/ou partícula.</i>	<i>Sim. Essa lógica rege o “mundo natural” em certos níveis de Realidade, e é exatamente a essência do Princípio da Dualidade da Luz, pois ela é onda e também partícula.</i>
	<i>Não respondeu a questão, apesar de na questão anterior ter feito uma boa</i>	<i>Sim. Esta lógica dá fundamento para o fato de que a luz se comporta ora como</i>

C	reflexão sobre a necessidade de uma nova lógica. O aluno sugeriu a necessidade de uma nova lógica para que ele pudesse aceitar o Princípio da Dualidade da Luz.	<i>onda e ora como partícula, ou seja, não seria contraditório dizer que a luz é onda e ao mesmo tempo é partícula, pois existe um terceiro termo (T) sendo ao mesmo tempo A e não A.</i>
---	---	---

O **aluno A**, na etapa da *antecipação*, justificou sua resposta, tomando como base as ideias da Física contemporânea, considerando como algo esperado e possível a lógica do terceiro incluído (sendo comprovada no futuro e que não sendo uma lógica que fundamenta tal princípio no presente), mas sem ter apropriação, de fato, dessa lógica para justificar o Princípio da Dualidade, faz uso da abordagem experimental como prova real dos fenômenos e não como uma representação dos fenômenos. Na etapa da *revisão construtiva*, ele ampliou sua compreensão, observando o quanto a lógica do terceiro incluído se encaixa perfeitamente para explicar o Princípio da Dualidade da Luz.

O **aluno B**, na etapa de *antecipação*, iniciou uma reflexão sobre o universo microscópico, de forma desconexa, não concluiu sua resposta e nem fez relação com a pergunta em questão. Na etapa da *revisão construtiva*, demonstrou apropriação de um dos pilares, os diferentes níveis de Realidade, sendo isso a “essência” para o Princípio da Dualidade, apresentando desse modo um crescimento cognitivo.

O **Aluno C**, durante a etapa de *antecipação*, deixou a questão em branco, porém, após a vivência do Ciclo da Experiência de Kelly, demonstrou uma compreensão sobre o Princípio da Dualidade da Luz e respondeu de maneira objetiva e clara usando os elementos da lógica do terceiro incluído.

7 CONCLUSÕES

Esta dissertação teve como objetivo geral identificar as concepções dos estudantes universitários da Licenciatura em Física da UFRPE acerca do Princípio da Dualidade da Luz e verificar a evolução conceitual do grupo de educandos, ao longo do processo da intervenção didática e, por fim, analisar a possível contribuição do uso do pensamento Transdisciplinar na compreensão do Princípio da Dualidade da Luz. Para investigar como os estudantes concebem o Princípio da Dualidade, foi usado como estratégia da pesquisa o Ciclo da Experiência de George Kelly.

A análise qualitativa dos dados revelou que os alunos envolvidos na pesquisa demonstraram ter conhecimentos prévios sobre o Princípio da Dualidade da Luz. Todos afirmaram, antes da intervenção didática, que o Princípio da Dualidade diz respeito ao fato da luz se comportar como onda e partícula, porém não demonstraram perceber que, por trás dessa realidade existe a necessidade de uma nova lógica não Aristotélica para respaldar esse Princípio. É interessante observar que os alunos pesquisados estão de acordo com o Princípio da Dualidade, mesmo sabendo inexistir um experimento no qual possa se observar simultaneamente a luz como onda e como partícula, ou seja, o real fenômeno da dualidade onda-partícula. Após a intervenção didática, através da realização do Ciclo da Experiência de Kelly, com os alunos A, B e C que participaram de todo o processo foi observado que todos os três incorporaram no seu discurso a necessidade de uma nova lógica não Aristotélica, que permitisse um axioma do terceiro incluído para se adequar ao Princípio da Dualidade.

A seguir realizaremos um relato do processo de cada um dos alunos investigados durante o processo do Ciclo de Kelly.

Com relação ao **aluno A**, observamos que, no início da nossa pesquisa, suas concepções estavam baseadas em experiências físicas, fazendo referência aos conteúdos aprendidos no seu curso, tomando como base as ideias da Física contemporânea. Isto já era esperado para um aluno nos últimos anos do curso de Licenciatura em Física. Após a vivência do Ciclo da Experiência de Kelly, focou sua resposta não mais apenas em aspectos físicos, mas também em aspectos da Transdisciplinaridade, apresentando uma evolução conceitual em seu discurso, ao apropriar-se de conceitos referentes aos pilares da Transdisciplinaridade (níveis

de Realidade, lógica do terceiro incluído) para justificar suas respostas, ampliando assim sua compreensão. Este aluno salientou que a lógica do terceiro incluído se encaixa perfeitamente ao Princípio da Dualidade da Luz.

Com relação ao **aluno B**, percebemos que, no início do Ciclo da Experiência de Kelly, ele não cogitava a possibilidade da existência de uma lógica que respaldasse o Princípio da Dualidade e, da mesma forma que o **Aluno A**, fundamentou sua resposta na teoria aprendida no curso de Licenciatura em Física. Respondeu aos instrumentos de investigação usados de maneira objetiva, mas sem nenhuma referência as dificuldades em se ajustar o Princípio da Dualidade e a lógica Aristotélica. Entretanto, após a vivência do Ciclo da Experiência, as respostas foram bem fundamentada tanto do ponto de vista físico como lógico, demonstrando desse modo que tanto os experimentos quanto a oficina transdisciplinar permitiram que o aluno B se apropriasse tanto das bases que envolvem o Princípio da Dualidade da Luz como da lógica do terceiro incluído.

No que diz respeito ao **Aluno C**, no início da pesquisa, apresentava um discurso evasivo, não sendo claro em suas respostas e sem maiores aprofundamentos sobre o Princípio da Dualidade. Porém, observamos que, ao longo do Ciclo da Experiência de Kelly, ele fez uma reflexão sobre a lógica Aristotélica e a necessidade de abandoná-la para que fosse possível a compreensão do Princípio da Dualidade isso demonstra sua evolução.

Percebemos que os três alunos evoluíram. Mas como o ponto de partida de cada um não era o mesmo, já se esperava que as mudanças ocorridas fossem de forma diferente, corroborando o que explicita o Corolário da Individualidade de Kelly: “As pessoas se diferenciam uma das outras nas construções de eventos”.

As nossas conclusões estão de acordo com a teoria de Kelly, quando menciona o Corolário da Experiência, quando diz que quanto maior for o número de Revisões Construtivas realizadas de um mesmo acontecimento, maior será a variação no sistema de construção da pessoa. Portanto, se fosse repetido todo o Ciclo da Experiência com os mesmos três experimentos didáticos e a oficina Transdisciplinar, certamente obteríamos cada vez mais ampliação dos sistemas de construtos dos alunos.

Embora todos os alunos da pesquisa já tivessem conhecimentos prévios sobre o Princípio da Dualidade, por haverem estudado as disciplinas de Física Geral e Experimental IV e Física Moderna, após as intervenções didáticas, percebeu-se que eles evoluíram de forma significativa, ampliando suas concepções conceituais a respeito do Princípio da Dualidade da Luz e da lógica do terceiro incluído que respalda esse Princípio.

É bastante compreensível que, após a leitura dos textos, debates e discussões sobre o pensamento Transdisciplinar e seus pilares, os estudantes apresentem evolução conceitual e que comecem a refletir, compreendendo melhor a dualidade da onda-partícula, fazendo-se necessário apropriar-se da necessidade de uma nova lógica. A pesquisa evidenciou a existência de um déficit nas disciplinas do curso de Licenciatura em Física com relação aos fundamentos lógicos dos princípios físicos, tal como o da lógica do terceiro incluído que possibilita a compreensão adequada do Princípio da Dualidade da Luz. Questionamos, então, como futuros professores podem despertar o pensamento crítico em seus futuros alunos se não desenvolveram sua própria criticidade?

Percebemos que todos os alunos sabiam da natureza dual da luz, aceitavam essa natureza, mas não observavam que a dualidade não se “encaixava” com a lógica a que estavam acostumados para respaldar seus conhecimentos: a lógica Aristotélica. Eles só notaram que existia algo a mais, no decorrer da nossa pesquisa, quando foram “apresentados” à Transdisciplinaridade e a seus pilares, quando então puderam compreender a necessidade de uma nova lógica, descartando a lógica anterior, a Aristotélica para melhor entender o Princípio da Dualidade da Luz.

É interessante observar que os alunos tiveram em sua formação acadêmica um processo de aprendizagem tradicional, no entanto para compreensão adequada do Princípio da Dualidade se faz necessário uma mudança nos fundamentos lógicos que respaldam a Física, por conseguinte, estamos diante de duas “forças” que se opõem: “a tradição” e “a inovação”. Entre as duas, temos o Ciclo de Kelly, promovendo as transformações e a mediação do pesquisador para colaborar nessa construção. Observamos não ser “fácil” ou “tranquilo” aceitar ou entender a necessidade de uma nova lógica, mas a intervenção didática ajudou nesse aspecto, evidenciando o quanto é importante a atuação do professor.

Em nosso trabalho, buscamos a partir do questionamento inicial, obedecendo à hipótese de trabalho, seguindo os objetivos tanto o geral quanto os específicos, responder a pergunta de pesquisa: Como o Pensamento Transdisciplinar pode auxiliar na compreensão do Princípio da Dualidade da Luz?

Durante o desenvolvimento do trabalho foi possível concluir que: **(i) que as concepções prévias dos estudantes da Licenciatura em Física da UFRPE acerca do Princípio da Dualidade da Luz eram desprovidas de uma lógica que respaldasse tal Princípio e (ii) os experimentos didáticos propostos e a oficina sobre a Transdisciplinaridade, realizadas durante o Ciclo da Experiência Kellyana, puderam contribuir para que os estudantes tivessem uma maior compreensão do Princípio da Dualidade da Luz.**

Por isso, deixamos como sugestão a introdução das bases do Pensamento Transdisciplinar nos cursos de formação inicial em Licenciatura em Física, considerando que tal pensamento poderia contribuir, de forma significativa, para que os alunos pudessem superar a lógica Aristotélica, dentro de uma visão mais ampla sobre o Princípio da Dualidade, compreendendo sua dimensão complexa e o contexto que envolve os universos macro e micro com seus diferentes níveis de Realidade.

8 REFERÊNCIAS

BASTOS, Heloisa F. B. N. **A Teoria do Construto Pessoal**. Depto. de Educação. UFRPE. Recife. 1998.

BADESCU, Horia. **Stéphane Lupasco: O homem e a obra**; sob a direção de Horia Badescu e Basarab Nicolescu. Trad. Lucia Pereira de Souza. São Paulo: Triom, 2001.

BARDIN, Laurence. **Análise de conteúdo**. Lisboa: Edições 70, 2000.

BARTHEM, R. **A Luz**. 1ª ed. São Paulo: Editora Livraria da Física: Sociedade Brasileira de Física, 2005.

BRASIL, **Secretaria de Educação Média Tecnologia**. Parâmetros Curriculares Nacionais: Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologia-Brasília: MEC; SEMETEC, 1999.

CAPRA, F. **A teia da vida**: uma nova compreensão dos sistemas vivos. São Paulo: Cultrix, 1997.

CARVALHO, A. M. P. (org.) **Ensino de ciências**: unindo a pesquisa e a prática. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004.

CLONINGER, Susan C. **Teoria da Personalidade**. Trad. Claudia Berliner. São Paulo: Martins Fontes, 1999.

FOUREZ, Gerard. **A construção das ciências**: Introdução à filosofia e a ética das ciências, trad. Luis Paulo Rouanet. São Paulo: Editora da Universidade Estadual Paulista, 1995.

HALLIDAY, D; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física**. V.4; 4ª ed., Rio de Janeiro: ed. Livros Técnicos e Científicos, 1995.

HALL,C.S.; LINDZEY,G.; CAMPBELL, J.B., **Teorias da Personalidade**. Trad. Maria Adriana Veríssimo Veronese. – 4ed. – Porto Alegre: Artes médicas Sul, 2000.

ILLUMINATING SCIENCE. **Wave/Particle duality**. Disponível em:
www.illuminatingscience.org/waveparticle-duality/Acesso: 17/ 08 / 2007 às 23h22min

MARIOTTI, H. **As paixões do ego**. Complexidade, política e solidariedade. 2ªed. São Paulo: Palas Athena, 2002.

MORAES, Roque (Org.) **Construtivismo e ensino de ciências**: reflexões epistemológicas e metodológicas. Porto Alegre: EDIPUCRUS, 2000.

MORIN, E.; CIURANA, E. R.; MOTTA, R. D. **Educar na era planetária**: o pensamento complexo como método de aprendizagem no erro e na incerteza humana. São Paulo: Cortez – UNESCO, 2003.

MORIN, E.; CONCEIÇÃO, M. A.; ASSIS, E. C., (Orgs). **Educação e complexidade**. 4ª ed. – São Paulo: Cortez, 2007.

MORIN, E. **Introdução ao pensamento complexo**. Trad.: Eliane Lisboa. Porto Alegre: Sulina, 2006.

MOREIRA, Marco A. **Teorias de aprendizagem**. São Paulo: EPU, 1999.

MOURÃO, Ronaldo Rogério de Freitas. **Explicando a teoria da relatividade**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Ediouro, 2005.

NICOLESCU, B. **O manifesto da Transdisciplinaridade**. São Paulo: Triom. 5ª ed., 2005.

_____. **Um novo tipo de conhecimento – Transdisciplinaridade**- Disponível em: <http://scholar.google.com.br/scholar?q=Um+novo+tipo+de+Conhecimento+%E2%80%93+Transdisciplinaridade&hl=pt-BR&um=1&ie=UTF-8&oi=scholar>. Acesso: 01 / 04 / 2008 às 19h29min.

PAIS, Abraham. **Einstein viveu aqui**. Trad. Carolina Alfaro. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1997.

PAIS, Abraham. **“Sutil é o Senhor...”**: a ciências e a vida de Albert Einstein. Trad. Fernando Parentes e Viriato Esteves; revisão da tradução: César Benjamin. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1995.

PRESTES, M. L. de M. **A pesquisa e a construção do conhecimento científico**: do planejamento aos textos, da escola à academia. 2ª ed. ver. atual e ampliada. São Paulo: Rêspel, 2003.

QUEM SOMOS NÓS? (What the Bleep do We Know?). **Direção: William Arntz, Betsy Chase e Mark Vicente. Intérpretes**. Marlee Matlin, Elaine Hendrix, Barry Newman; Playart Pictures, 2005. 1 DVD (150 min), son., color.

RAMALHO, F.; GILBERTO, N.; ANTÔNIO P. **Os fundamentos da física**. V.3; 8ª ed. São Paulo: Moderna, 2003.

TIPLER, P.A. **Física**. V.1b; 2ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1984.

TIPLER, P. A; MOSCA G. Física para cientista e engenheiros. **Física Moderna**: mecânica quântica, relatividade e a estrutura da matéria. V.3; 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

TRONCA, D. S. **Transdisciplinaridade em Edgar Morin**. Caxias do Sul: Educus, 2006.

SOMMERMAN, Américo. **Inter ou Transdisciplinaridade?** da fragmentação disciplinar ao novo diálogo entre os saberes. São Paulo: Paulus, 2006.

STUDART, Nelson. O enigma do moinho de luz. **Física na Escola**, São Carlos - São Paulo V.8, nº 1, 2007, p. 1-2.

SÉRGIO, P. R; ANDRADE, R. M. Gênios da ciência. **Scientific American Brasil**. Pinheiros - São Paulo ed. Especial, nº 13, 2007, p. 44 -55.

SCHIEL, Dietrich e GUERRINI Iria Müller. **Aplicação do SAM em Ótica**. Disponível em: http://educar.sc.usp.br/sam/cuba2/exp_5difracao.html - Acesso: 15 / 08 / 2007 às 23h59min

UNIVERSITY OF COLORADO OF BOULDER. **Interactive simulations**. Disponível em: http://phet.colorado.edu/simulations/sims.php?sim=Wave_Interference Acesso: 04 / 04 / 2008 às 23h25min

APÊNDICES

APÊNDICE – A Questionário de pesquisa

Nome: _____ Idade: _____ Data: _____

Ingressou na UFRPE em que ano: _____ Período de Curso: _____

1. O que caracteriza o Princípio da Dualidade da Luz?

2. Pensar que a luz pode comportar-se de forma dual é razoável? Justifique sua resposta.

3. A partir da lógica Aristotélica, que se baseia nos seguintes axiomas: 1. O axioma da identidade: A é A (Ferro é Ferro); 2. O axioma da não-contradição: A não é não A (Madeira não é Ferro); 3. O axioma do terceiro excluído: não existe um terceiro termo T, que ao mesmo tempo seja A e não A (não existe nada que seja Madeira e Ferro). Esta lógica pode ser aplicada ao Princípio da Dualidade da Luz? Justifique sua resposta.

4. A natureza pode ser regida por uma lógica complexa não Aristotélica que leva em consideração diferentes níveis de Realidade, de maneira que exista um terceiro termo T sendo ao mesmo tempo A e não A. Uma lógica desse tipo poderia ser aplicada ao Princípio da Dualidade da Luz? Justifique sua resposta.

Obrigado pela sua participação!

APÊNDICE – B

Um texto introdutório sobre o Princípio da Dualidade da Luz e o Pensamento Transdisciplinar

1. Princípio da Dualidade da Luz

Newton (1642-1727) defendia a hipótese de que a luz era constituída de corpúsculos. No entanto, como algumas propriedades óticas não puderam ser explicadas com o uso da teoria corpuscular, a teoria ondulatória, proposta por Huygens (1629-1695), mostrou-se mais adequada para descrever a propagação luminosa. Apesar disso, a autoridade científica de Newton fez prevalecer sua teoria por mais de um século, e assim somente em 1801, a experiência da fenda dupla, realizada por Thomas Young (1773-1829) trouxe evidências experimentais para a teoria ondulatória da luz de Huygens. A experiência de Young mostrou que a luz sofria difração e interferência, que são características tipicamente ondulatórias anos após em 1905, para explicar o efeito fotoelétrico Einstein usou uma ideia similar à de Newton, segundo a qual, ao invés de pensarmos na luz como uma onda, deveríamos imaginá-la constituída de corpúsculos, denominados fótons. Desse modo com a explicação do efeito fotoelétrico, ficou compreensível que a luz tem um caráter dualístico e dependendo das circunstâncias, poderia ser vista como onda (p.ex. o fenômeno da interferência e da difração), ou como partícula (p.ex. o efeito fotoelétrico e o espalhamento Compton).

A teoria da natureza ondulatória da luz pode não explicar o efeito fotoelétrico, mas permite compreender os fenômenos de interferência e difração da luz uma vez que o mesmo raio de luz pode difratar ao redor de um obstáculo e daí, incidir na superfície de um metal, provocando a emissão de fotoelétrons.

Considerando que a luz demonstrava ter propriedades ondulatórias e corpusculares, seria natural perguntar se a matéria (por ex., os elétrons e os prótons) também apresentava tais características. Em 1924, o estudante francês de física, Louis de Broglie, sugeriu essa ideia em sua tese de doutorado. Seu trabalho foi altamente especulativo, uma vez que, naquele tempo, ainda não havia evidências sobre o caráter ondulatório da matéria. De Broglie propôs a hipótese de que a matéria também se comporta como onda. Assim, não só a luz se comporta como partícula, porém as partículas também podem se comportar como ondas.

Já em 1927, C. J. Davisson e L. H. Germer realizaram uma experiência na qual se observava a difração e a interferência de ondas de elétrons, quando estudavam o espalhamento de elétrons, utilizando um alvo de níquel, nos laboratórios da Bell Telephone Co. Por fim, após as experiências realizadas por Davisson e Germer, verificaram que o comprimento de onda desse resultado concordava com o da equação de Louis de Broglie.

Outra experiência no mesmo ano 1927, realizada por G.P. Thomson (filho de J.J. Thomson), trabalhando na Universidade de Aberdeen, na Escócia, confirmou o comprimento de onda de Louis de Broglie, usando um raio X e elétrons passando, através de uma chapa (folha) de alumínio. Ao término da experiência, os comprimentos de onda dos elétrons medidos concordavam com os previstos pelo modelo de Louis de Broglie.

2. Pensamento Transdisciplinar

Segundo Nicolescu, Basarab (2005), os três pilares da Transdisciplinaridade são a complexidade, os diferentes níveis de Realidade e a lógica do terceiro incluído. Os níveis de Realidade e a lógica do terceiro incluído são de fundamental importância na compreensão do Princípio da Dualidade da Luz.

3. Lógica Aristotélica (lógica do terceiro excluído) e a lógica do terceiro incluído

Segundo a lógica Aristotélica é baseada em três axiomas:

1. O axioma da identidade: $A \text{ é } A$;
2. O axioma da não contradição: $A \text{ não é não } A$;
3. O axioma do terceiro excluído: não existe um terceiro termo T (T de ‘terceiro incluído’) que é ao mesmo tempo A e não A .

Com base nesta lógica, se a luz é onda então a luz não pode ser partícula e não existe a possibilidade da luz ser ao mesmo tempo onda e partícula (terceiro excluído). Desta forma, a lógica Aristotélica não é adequada para entender o Princípio da Dualidade da Luz.

Para compreender o Princípio da Dualidade da Luz é requerida uma nova lógica não Aristotélica, denominada de lógica do terceiro incluído, que considera a existência de diferentes níveis de Realidade. Nesta lógica, é introduzido um terceiro termo T (terceiro incluído) que é ao mesmo tempo A e não A , ou seja, no caso da luz que ela seja onda (A) ou

corpúsculo (não onda / não A) em um nível de Realidade (macrofísico) e num outro nível de Realidade (microfísico / quântico) seja um quantum (onda-corpúsculo/ A e não A).

Referências:

- CAPRA, F. **A teia da vida: uma nova compreensão dos sistemas vivos.** São Paulo: Cultrix, 1997.
- NICOLESCU, B. **O manifesto da Transdisciplinaridade.** São Paulo: Triom. 5ª ed., 2005.
- TIPLER, P.A. **Física.** V.1b; 2ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1984.
- TIPLER, P. A; MOSCA G. Física para cientista e engenheiros, **Física Moderna:** mecânica quântica, relatividade e a estrutura da matéria. V.3; 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

APÊNDICE C - Questionário de sondagem

Nome: _____ Data: _____

01. Na sua concepção, a luz pode ser ao mesmo tempo onda e partícula? Justifique sua resposta.

02. O Princípio da Dualidade da Luz pode ser compreendido com o auxílio do Pensamento Transdisciplinar? Justifique sua resposta.

03. A lógica do terceiro incluído é mais adequada que a lógica do terceiro excluído para compreensão do Princípio da Dualidade da Luz? Justifique sua resposta.

APÊNDICE D - Plano de Aula I

Utilizando Ciclo da experiencia de Kelly como ferramenta metodológica.

Etapa de Antecipação e Investimento

Objetivo dessa etapa: fazer com que os estudantes elaborem suas hipóteses a partir do comportamento de uma onda mecânica.

1 Momento: apresentação.

✓ Duração: 5 minutos

2 Momento: responder o pré-teste com toda turma.

✓ Duração: 40 minutos

3 Momento: sorteio das letras dos respectivos grupos de sala.

✓ Duração: 5 minutos

Etapa de Encontro

Objetivo dessa etapa: introduzir as hipóteses cientificamente corretas sobre o comportamento de uma onda mecânica para serem confrontadas com as hipóteses formuladas pelos estudantes.

4 Momento: abordagem do experimento cuba de onda.

✓ Duração: 30 minutos

Etapa de validação e Revisão Construtiva

Objetivo dessa etapa: confirmar ou rejeitar as hipóteses formuladas pelos estudantes e consolidar as hipóteses científicas como verdadeiras.

5 Momento: levantamento da discussão de grupo através de gravações ou registro das conclusões das equipes.

✓ Duração: 10 minutos

6 Momento: discussão com toda a turma, mediada pelo pesquisador.

✓ Duração: 10 minutos

APÊNDICE E - Plano de Aula II

Utilizando Ciclo da experiencia de Kelly como ferramenta metodológica.

Etapa de Antecipação e Investimento

Objetivo dessa etapa: fazer com que os estudantes elaborem suas hipóteses a respeito do comportamento de uma onda luminosa o laser ou uma onda eletromagnética.

1 Momento: apresentação.

✓ Duração: 5 minutos

2 Momento: responder o pré-teste com toda turma.

✓ Duração: 40 minutos

3 Momento: formação dos grupos de sala por letras.

✓ Duração: 5 minutos

Etapa de Encontro

Objetivo dessa etapa: introduzir as hipóteses cientificamente correta sobre o comportamento de uma onda luminosa.

4 Momento: abordagem do experimento dupla fenda de Young.

✓ Duração: 30 minutos

Etapa de validação e Revisão Construtiva

Objetivo dessa etapa: confirmar ou rejeitar as hipóteses formulada sobre o comportamento de uma onda luminosa como uma verdade científica.

5 Momento: levantamento da discussão de grupo através de gravações ou registro das conclusões das equipes.

✓ Duração: 10 minutos

6 Momento: discussão com toda a turma, mediada pelo pesquisador.

✓ Duração: 10 minutos

APÊNDICE F - Plano de Aula III

Etapa de Antecipação e Investimento

Objetivo dessa etapa: fazer com que os estudantes elaborem suas hipóteses a partir da luz como uma partícula ou fótons de luz.

1 Momento: apresentação.

✓ Duração: 5 minutos

2 Momento: responder o pré-teste com toda turma.

✓ Duração: 40 minutos

3 Momento: formação dos grupos de sala por letras.

✓ Duração: 5 minutos

Etapa de Encontro

Objetivo dessa etapa: introduzir as hipóteses cientificamente corretas sobre o comportamento da luz como uma partícula.

4 Momento: abordagem do experimento radiômetro de Crookes.

✓ Duração: 30 minutos

Etapa de validação e Revisão Construtiva

Objetivo dessa etapa: confirmar ou rejeitar as hipóteses formulada como verdadeira sobre o comportamento da luz enquanto fóton.

5 Momento: levantamento da discussão de grupo através de gravações ou registro das conclusões das equipes.

✓ Duração: 10 minutos

6 Momento: discussão com toda a turma, mediada pelo pesquisador.

✓ Duração: 10 minutos

APÊNDICE G - Plano de Aula IV

Etapa de Antecipação e Investimento

Objetivo dessa etapa: fazer com que os estudantes elaborem suas hipóteses a partir do pensamento Transdisciplinar e permitir que eles façam uma pesquisa antes do Encontro sobre o tema.

1 Momento: apresentação.

✓ Duração: 5 minutos

2 Momento: responder o pós-teste com toda turma.

✓ Duração: 40 minutos

3 Momento: formação dos grupos de sala por letras.

✓ Duração: 5 minutos

Etapa de Encontro

Objetivo dessa etapa: introduzir as hipóteses cientificamente corretas sobre o pensamento Transdisciplinar, utilizando-se como abordagem um texto extraído do livro o manifesto da Transdisciplinaridade de Basarab Nicolescu.

4 Momento: abordagem do experimento cuba de onda.

✓ Duração: 30 minutos

Etapa de validação e Revisão Construtiva

Objetivo dessa etapa: confirmar ou rejeitar as hipóteses formulada pelos estudantes sobre o pensamento Transdisciplinar.

5 Momento: levantamento da discussão de grupo através de gravações ou registro das conclusões das equipes.

✓ Duração: 10 minutos

6 Momento: discussão com toda a turma, mediada pelo pesquisador.

✓ Duração: 10 minutos

ANEXOS

ANEXO A - Carta da Transdisciplinaridade

(Elaborada no Primeiro Congresso Mundial da Transdisciplinaridade, Convento de Arrábida, Portugal, 2 a 6 de novembro de 1994).

Preâmbulo

Considerando que a proliferação atual das disciplinas acadêmicas conduz a um crescimento exponencial do saber, que torna impossível qualquer olhar global do ser humano;

Considerando que somente uma inteligência que se dá conta da dimensão planetária dos conflitos atuais poderá fazer frente à complexidade de nosso mundo e ao desafio conetoponâneo de autodestruição material e espiritual de nossa espécie;

Considerando que a vida está fortemente ameaçada por uma tecnociência triunfante que obedece apenas à lógica assutadora da eficácia pela eficácia;

Considerando que a ruptura conteporânea entre um saber cada vez mais acumulativo e um ser interior cada vez mais empobrecido leva à ascensão de um novo obscurantismo, cujas consequências sobre o plano individual e social são incalculáveis;

Considerando que o crescimento do saber, sem precedentes na história, aumenta a desigualdade entre seus detentores e os que são desprovidos dele, engendrando assim desigualdade crescentes no seio dos povos e entre as nações do planeta;

Considerando simultaneamente que todos os desafios enuciados possuem sua contrapartida de esperança e que o crescimento extraordinário do saber pode conduzir a uma mutação compatível à evolução dos hominídeos à espécie humana;

Considerando o que procede, os participantes do Primeiro Congresso Mundial de transdisciplinaridade (Convento de Arrábida, Portugal 2 - 7 de novembro de 1994) adotaram o presente Protocolo entendido como um conjunto de princípios fundamentais da comunidade de espírito transdisciplinares, constituindo um contrato moral que todo signatário deste Protocolo faz consigo mesmo, sem qualquer pressão jurídica e institucional.

Artigo 1:

Qualquer tentativa de reduzir o ser humano a uma mera definição e de dissolvê-lo nas estruturas formais, sejam elas quais forem, é incompatível com a visão transdisciplinar.

Artigo 2:

O reconhecimento da existência de diferentes níveis de realidade, regidos por lógicas diferentes é inerente à atitude transdisciplinar. Qualquer tentativa de reduzir a realidade a um único nível regido por única lógica não se situa no campo da transdisciplinaridade.

Artigo 3:

A transdisciplinaridade é complementar à aproximação disciplinar: faz emergir da confrontação das disciplinas dados novos que as articulam entre si; oferece-nos uma nova visão da natureza e da realidade. A transdisciplinaridade não procura o domínio sobre as várias outras disciplinas, mas a abertura de todas elas àquilo que as atravessa e as ultrapassa.

Artigo 4:

O ponto de sustentação da transdisciplinaridade reside na unificação semântica e operativa das acepções através e além das disciplinas. Ela pressupõe uma racionalidade aberta mediante um novo olhar, sobre a relatividade das noções de “definição” e de “objetividade”. O formalismo excessivo, a rigidez das definições e o absolutismo da objetividade comportando a exclusão do sujeito levam ao empobrecimento.

Artigo 5:

A visão transdisciplinar está resolutamente aberta na medida em que ela ultrapassa o campo das ciências exatas por devido ao seu diálogo e sua reconciliação não somente com as ciências humanas mas também com a arte, a literatura, a poesia e a experiência espiritual.

Artigo 6:

Com relação à interdisciplinaridade e à multidisciplinaridade, a transdisciplinaridade é multirreferencial e multidimensional. Embora levando em conta os coceitos de tempo e de história, a transdisciplinaridade não exclui a existência de um horizonte trans-histórico.

Artigo 7:

A transdisciplinaridade não constitui uma nova religião, nem uma nova filosofia, nem uma nova metafísica, nem uma ciência das ciências.

Artigo 8:

A dignidade do ser humano é também de ordem cósmica e planetária. O surgimento do ser humano sobre a Terra é uma das etapas da história do Universo. O reconhecimento da Terra como pátria é um dos imperativos da transdisciplinaridade. Todo ser humano tem direito a uma nacionalidade, mas, a título de habitante da Terra, ele é, ao mesmo tempo, um ser transnacional. O reconhecimento pelo direito internacional de uma dupla cidadania - referente a uma nação e à Terra - constitui um dos objetivos da pesquisa transdisciplinar.

Artigo 9:

A transdisciplinaridade conduz a uma atitude aberta em relação aos mitos, às religiões e àqueles que os respeitam num espírito transdisciplinar.

Artigo 10:

Não existe um lugar cultural privilegiado de onde se possam julgar as outras culturas. A abordagem transdisciplinar é ela própria transcultural.

Artigo 11:

Uma educação autêntica não pode privilegiar a abstração no conhecimento. Deve ensinar a contextualizar, concretizar e globalizar. A educação transdisciplinar reavalia o papel da intuição, da imaginação, da sensibilidade e do corpo na transmissão dos conhecimentos.

Artigo 12:

A elaboração de uma economia transdisciplinar estar baseada no postulado de que a economia deve estar a serviço do ser humano e não o inverso.

Artigo 13:

A ética transdisciplinar recusa toda atitude que se negue ao diálogo e à discussão, seja qual for sua origem – de ordem ideológica, científica, religiosa, econômica, política ou filosófica. O saber compartilhado deveria conduzir a uma compreensão compartilhada, baseada no respeito absoluto das diferenças entre os seres, unidos pela vida comum sobre uma única e mesma Terra.

Artigo 14:

Rigor, abertura e tolerância são características fundamentais da atitude e da visão transdisciplinar. O rigor na argumentação, que leva em conta todos os dados, é a melhor barreira contra possíveis desvios. A abertura comporta a aceitação do desconhecido, do inesperado e do imprevisível. A tolerância é o reconhecimento do direito às ideias e verdades contrárias às nossas.

Artigo final:

A presente Carta Transdisciplinar foi adotada pelos participantes do Primeiro Congresso Mundial de transdisciplinaridade, que não reivindicaram nenhuma outra autoridade a seu próprio trabalho e da sua própria atividade.

Segundo os procedimentos que serão definidos de acordo com as mentes transdisciplinares de todos os países, esta carta está aberta à assinatura de qualquer ser humano interessado em promover nacional e internacionalmente e transnacionalmente as medidas progressivas para a aplicação destes artigos na vida cotidiana.

Convento de Arrábida, 6 de novembro de 1994

Comitê de Redação

Lima de Freitas, Edgar Morin, Basarab Nicolescu

ANEXO B – Esquema de pesquisa da etapa de *encontro* de Kelly

