



**NOÇÕES DE FÍSICA QUÂNTICA A PARTIR DO ESTUDO DO FUNCIONAMENTO DE  
DISPOSITIVOS SEMICONDUTORES – UMA UNIDADE DE ENSINO POTENCIALMENTE  
SIGNIFICATIVA PARA 3ª SÉRIE DO ENSINO MÉDIO**

**GUSTAVO DE CARVALHO CAMPOS**

DISSERTAÇÃO DE Mestrado APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA NO CURSO DE Mestrado Nacional Profissional de Ensino de Física (MNPEF), COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENSINO DE FÍSICA.

**ORIENTADOR:** PROF. DR. ANTONIO VIEIRA DE A. NETO

**Co-ORIENTADORA:** PROF<sup>a</sup> DR<sup>a</sup> GABRIELA RIBEIRO PEIXOTO REZENDE PINTO

**FEIRA DE SANTANA  
JUNHO DE 2016**

Ficha Catalográfica – Biblioteca Central Julieta Carteado – UEFS

C212 Campos, Gustavo de Carvalho  
Noções de física quântica a partir do estudo do funcionamento de dispositivos semicondutores – uma unidade de ensino potencialmente significativa para 3ª Série do Ensino Médio / Gustavo de Carvalho Campos . – Feira de Santana, 2016.  
207 f.: il.

Orientador: Antonio Vieira de Andrade Neto.  
Coorientadora: Gabriela Ribeiro Peixoto Rezende Pinto.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Feira de Santana, Mestrado Nacional Profissional de Ensino de Física (MNPEF), 2016.

1. Física quântica. 2. Dispositivos semicondutores. 3. Física – Ensino. 4. Aprendizagem significativa. I. Andrade Neto, Antonio Vieira de, orient. II. Pinto, Gabriela Ribeiro Peixoto Rezende, coorient. III. Universidade Estadual de Feira de Santana. IV. Título.

CDU: 530.145:37

**NOÇÕES DE FÍSICA QUÂNTICA A PARTIR DO ESTUDO DO FUNCIONAMENTO DE  
DISPOSITIVOS SEMICONDUTORES – UMA UNIDADE DE ENSINO POTENCIALMENTE  
SIGNIFICATIVA PARA 3ª SÉRIE DO ENSINO MÉDIO**

**GUSTAVO DE CARVALHO CAMPOS**

PROF. DR. ANTONIO VIEIRA DE A. NETO  
PROF<sup>a</sup>. DR<sup>a</sup> GABRIELA RIBEIRO PEIXOTO REZENDE PINTO

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Estadual de Feira de Santana no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Aprovada por:

---

Dr. Antônio Vieira de Andrade Neto (Orientador)

---

Dr. Álvaro Santos Alves (Membro Interno)

---

Dr. José Carlos Oliveira de Jesus (Membro Interno)

---

Dr. Carlos Eduardo Magalhães de Aguiar (Membro Externo)

**FEIRA DE SANTANA  
JUNHO DE 2016**

Dedico esse trabalho aos meus pais, Jorge Luiz da Mota Campos e Maria Luzia de Carvalho Campos e a minha querida irmã Mariluze pelo amor, carinho e incentivo na minha luta.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus familiares que me apoiaram em todos os momentos independentemente dos altos e baixos durante esses três anos; sem este apoio e suporte a minha passagem por essa experiência teria sido consideravelmente mais árdua.

Agradeço ao professor Antonio Neto e à professora Gabriela Rezende, meus orientadores, que diferentemente de uma relação de autoritarismo, mostraram-se parceiros e mediadores da minha aprendizagem, me propiciando autonomia para pensar sobre minhas reais expectativas enquanto pesquisador e, ao mesmo tempo, me auxiliando em aspectos que nortearam a minha forma de pesquisar em ensino de Física.

Agradeço ao Felipe Pinheiro, pela sua contribuição na elaboração da simulação “Estrutura de Bandas”. Este recurso foi muito bem desenvolvido por este estudante do curso de Engenharia da Computação da UEFS e contribuiu para os resultados positivos desta pesquisa.

Agradeço também a todos os professores do polo 06 (UEFS) do Mestrado, que durante todo o curso mostraram grande interesse em desenvolver um trabalho de qualidade, nos exigindo o máximo que podíamos e, ao mesmo tempo, nos possibilitando um crescimento acadêmico proporcional à nossa vontade de aprender.

Agradeço ao coordenador do programa do MNPEF, Álvaro Alves, por manter a proposta Nacional do Mestrado Profissional e, com paciência, readaptá-la para os professores pesquisadores da região.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior - CAPES pelo incentivo financeiro destinado aos Estudantes da Pós-Graduação.

Devo agradecimentos à vários colegas de trabalho do Colégio Estadual Normal de Serrinha que respeitaram a minha correria pela escola para tentar cumprir com o tempo de aplicação da sequência de aulas propostas.

Agradeço à diretora Francineide Queiroz que fez o possível para ajudar no que necessitei durante as intervenções na escola.

Por fim ficam os meus cumprimentos e agradecimentos a outras pessoas que, indiretamente, contribuíram com minha caminhada até aqui.

*"Um homem a quem foi dada a oportunidade de abençoar o mundo com uma grande ideia criativa não precisa do louvor da posteridade. Sua própria façanha já lhe conferiu uma dádiva maior!"*

*Albert Einstein, sobre Max Planck*

## RESUMO

### NOÇÕES DE FÍSICA QUÂNTICA A PARTIR DO ESTUDO DO FUNCIONAMENTO DE DISPOSITIVOS SEMICONDUTORES – UMA UNIDADE DE ENSINO POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVA PARA 3ª SÉRIE DO ENSINO MÉDIO

Gustavo de Carvalho Campos

Orientadores:

Prof. Dr. Antonio Vieira De A. Neto

Profª. Drª Gabriela Ribeiro Peixoto Rezende Pinto

O distanciamento entre pesquisa e métodos de Ensino da Física em sala de aula vem sendo atenuado por um grupo de professores pesquisadores empenhados em melhorar a realidade de Ensino configurada atualmente nas escolas brasileiras. Os conteúdos da Física Moderna e Contemporânea (FMC) geralmente não são direcionados ao ensino básico, seja pela falta de experiência docente, pela falta de tempo ou pelas dificuldades dos alunos. Com isso, uma série de publicações sugerem, principalmente, a urgência em repensar o ensino da Física propondo a inserção destes conteúdos nas escolas de ensino básico. Em nosso trabalho, desenvolvemos uma UEPS (Unidade de Ensino Potencialmente Significativa) com o intuito de apresentar alguns conceitos da Física Quântica (FQ) a partir da problematização de um conteúdo mais geral e inclusivo – Funcionamento de Dispositivos Semicondutores. Grande parte do desenvolvimento destes dispositivos eletrônicos é proveniente das descobertas da Física dos últimos séculos, e, portanto, torna-se indispensável a inserção de, pelo menos, alguns dos seus tópicos no Ensino Médio. Buscamos trazer um relato de experiência a respeito da implementação desta UEPS numa turma de 3ª Série do Ensino Médio. A intervenção em sala de aula ocorreu em uma escola pública do município de Serrinha-BA. Durante a pesquisa foi solicitado dos estudantes a solução de questionários e elaboração de mapas conceituais para obtenção de indícios da Aprendizagem Significativa (AS) de conceitos da FQ. Foram considerados como critérios para análise dos dados, aspectos da teoria ausubeliana como a diferenciação progressiva e reconciliação integrativa. Nossos resultados mostram que a UEPS contribuiu para AS de vários conceitos da Física Quântica como Quantização e Teoria de Bandas. Podemos destacar a importância da construção dos mapas conceituais na constatação da AS, evidenciado pelo processo de hierarquização das ideias. Em contrapartida encontramos algumas barreiras na aplicação da UEPS, principalmente no que concerne aos problemas extrínsecos, como a permanência dos estudantes até o final das aulas.

**Palavras-chave:** Ensino de Física, Aprendizagem Significativa, Teoria de Bandas, Física Quântica, Efeito fotovoltaico, Eletroluminescência

## ABSTRACT

### NOTIONS OF QUANTUM PHYSICAL FROM STUDYING OF FUNCTIONING OF SEMICONDUCTOR DEVICES – A POTENTIALLY MEANINGFUL TEACHING UNIT FOR 3RD GRADE OF HIGH SCHOOL.

Gustavo de Carvalho Campos

Dr. Antonio Vieira De A. Neto (Supervisor)

Dra Gabriela Ribeiro Peixoto Rezende Pinto (Co-supervisor)

The distance between research and methods of quantum physics in the classroom has been attenuated by a group of teachers researchers committed to improving the quality of education configured currently in Brazilian schools. The contents of Modern and Contemporary Physics are generally not targeted to basic education, either by lack of teaching experience, the lack of time or by the students' difficulties. Thereby, a number of publications suggest mainly the urgency to rethink the teaching of physics by proposing the inclusion these contents in the basic education. In our work, we developed an UEPS (Unit of Teaching Potentially Significant) in order to present some concepts of quantum physics from the problematization of a more general and inclusive content - the functioning of semiconductor devices. Much of the development of these electronic devices comes from the discoveries of physics of the last centuries, and therefore it is essential the inclusion of at least some of the topics in high school. We seek to bring an experience report on the implementation of this UEPS in a class of 3rd grade of high school. The intervention in the classroom took place in a public school in the city of Serrinha-BA. During the research was requested to the students solving questionnaires and elaboration of conceptual maps to obtain evidence of Meaningful Learning of quantum physical's concepts. The criteria used for the data analysis was the aspects of Ausubel's theory as the progressive differentiation and integrative reconciliation. Our results show that the UEPS contributed to the Meanfull Learning of various concepts of quantum physics as Quantization and Theory of Bands. We highlight the importance of construction of conceptual maps in finding meaningful learning, evidenced by the tiering process of ideas. On the other hand we find some barriers in the implementation of UEPS, especially with regard to extrinsic problems, such as the permanence of students by the end of these classes.

**Keywords:** Physics Teaching, Meaningful Learning, Theory of Bands, Quantum Physics, Photovoltaic Effect, Electroluminescence

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Tabela de valores possíveis de $l$ e $m_l$ para $n = 1,2,3,\dots$ .....	39
<b>Figura 2.</b> Separação de níveis $3s$ para dois átomos de sódio próximos (a). Desdobramento dos níveis para seis átomos de sódio próximos (b) e (c) formação da banda $3s$ quando um número grande de átomos de sódio se aproxima para formação do sólido. ....	44
<b>Figura 3.</b> Função de onda resultante da combinação simétrica dos orbitais atômicos centrados em $r=0$ e $r=R$ .....	45
<b>Figura 4.</b> Função de onda resultante da combinação antissimétrica destes mesmos orbitais atômicos. ....	46
<b>Figura 5.</b> As curvas acima representam a energia total para orbitais ligantes (+) e não-ligante (-). ....	47
<b>Figura 6.</b> Representação esquemática de níveis atômicos não degenerados (a) e (b) Os níveis de energia para $N$ átomos em um potencial periódico, em função do inverso do espaçamento atômico médio. ....	48
<b>Figura 7.</b> (a) Energia potencial $V$ de um elétron ao longo do eixo $x$ do cristal mostrado em (b). ....	49
<b>Figura 8.</b> Rede periódica unidimensional infinita (grande número de átomos) .....	50
<b>Figura 9.</b> Bandas de energia permitidas e proibidas.....	51
<b>Figura 10.</b> Condutividade em $\Omega^{-1}m^{-1}$ de uma variedade de materiais à temperatura ambiente. ....	52
<b>Figura 11.</b> Estrutura de banda de isolantes, semicondutores e metais.....	53
<b>Figura 12.</b> Célula unitária da estrutura cristalina do diamante, na qual também cristalizam os semicondutores Si e Ge .....	54
<b>Figura 13.</b> Impurezas de átomos doadores no cristal de Si. ....	55
<b>Figura 14.</b> Impurezas de átomos aceitadores no cristal de Si. ....	56
<b>Figura 15.</b> Junção PN e Campo Elétrico na região de depleção.....	61
<b>Figura 16.</b> Esquema de um diodo semicondutor em polarização direta.....	62
<b>Figura 17.</b> Esquema do mecanismo de separação de cargas num dispositivo fotovoltaico. Assimetria para o movimento de elétrons e buracos.....	63
<b>Figura 18.</b> (a) Emissão de Luz de um semicondutor; (b) Absorção de Luz de um semicondutor.....	64

<b>Figura 19.</b> Esquema dos Procedimentos Metodológicos da Pesquisa.....	79
<b>Figura 20.</b> Esquema da UEPS elaborada (versão final) levando-se em consideração os instrumentos da Pesquisa.....	84
<b>Figura 21.</b> Esquema da UEPS elaborada (versão final).....	90
<b>Figura 22.</b> Slides propostos para a Aula 08.....	99
<b>Figura 23.</b> Slide 01 proposto para a Aula 08.....	99
<b>Figura 24.</b> Slide 02 proposto para a Aula 08.....	100
<b>Figura 25.</b> Slide 03 proposto para a Aula 08.....	100
<b>Figura 26.</b> Slide 04 proposto para a Aula 08.....	101
<b>Figura 27.</b> Slide 05 proposto para a Aula 08.....	101
<b>Figura 28.</b> Slide 06 proposto para a Aula 08.....	102
<b>Figura 29.</b> Slide 07 proposto para a Aula 08.....	102
<b>Figura 30.</b> Slide 08 proposto para a Aula 08.....	103
<b>Figura 31.</b> Slide 09 proposto para a Aula 08.....	103
<b>Figura 32.</b> Slide 10 proposto para a Aula 08.....	104
<b>Figura 33.</b> Tela principal da Simulação "Estrutura de Bandas" .....	105
<b>Figura 34.</b> Simulação exibindo o desdobramento em bandas de energia.....	105
<b>Figura 35.</b> Computadores reparados executando a Hipermídia "Semicondutores" .....	109
<b>Figura 36.</b> Exibição da Hipermídia "semicondutores" .....	110
<b>Figura 37.</b> Primeira versão de mapa conceitual elaborada pelo Estudante 11 .....	122
<b>Figura 38.</b> Segunda versão de mapa conceitual elaborada pelo Estudante 11 .....	123
<b>Figura 39.</b> Primeira versão de mapa conceitual elaborada pelo Estudante 25 .....	124
<b>Figura 40.</b> Segunda versão de mapa conceitual elaborado pelo Estudante 25 .....	125
<b>Figura 41.</b> Primeira versão de mapa conceitual elaborado pelo Estudante 27 .....	126
<b>Figura 42.</b> Segunda versão de mapa conceitual elaborado pelo Estudante 27 .....	127
<b>Figura 43.</b> Primeira versão de mapa conceitual elaborado pelo Estudante 13 .....	128
<b>Figura 44.</b> Segunda versão de mapa conceitual elaborado pelo Estudante 13 .....	128
<b>Figura 45.</b> Primeira versão de mapa conceitual elaborada pelo Estudante 01 .....	130
<b>Figura 46.</b> Segunda versão de mapa conceitual elaborada pelo Estudante 01 .....	131
<b>Figura 47.</b> Esquema ilustrando as energias eletrônicas em orbitais moleculares na molécula H <sub>2</sub> .....	151

<b>Figura 48.</b> Representação da formação de bandas em sólidos a partir de orbitais atômicos discretos. ....	153
--	-----

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1.</b> Descrição da UEPS – Semana 01 (Aulas 01 e 02). .....	91
<b>Quadro 2.</b> Descrição da UEPS – Semana 02 (Aulas 03 e 04). .....	93
<b>Quadro 3.</b> Descrição da UEPS – Semana 03 (Aulas 05 e 06). .....	95
<b>Quadro 4.</b> Descrição da UEPS – Semana 04 (Aulas 07 e 08). .....	97
<b>Quadro 5.</b> Descrição da UEPS – Semana 05 (Aulas 09 e 10). .....	106
<b>Quadro 6.</b> Desempenho dos estudantes referente ao Questionário 6.....	112
<b>Quadro 7.</b> Participação voluntária de cada estudante ao longo da UEPS.....	115

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1.</b> Percentual de estudantes que acertaram cada questão. ....	113
<b>Gráfico 2.</b> Frequência das respostas por questão.....	114
<b>Gráfico 3.</b> Escalas para análise qualitativa das versões de mapas conceitual construídas pelos estudantes, com base nos três aspectos estabelecidos. ....	118

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

**FQ** – FÍSICA QUÂNTICA

**AS** – APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA

**EF** – EFEITO FOTOVOLTAICO

**SD** – SEQUÊNCIA DIDÁTICA

**FMC** – FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA

**EM** – ENSINO MÉDIO

**UEPS** – UNIDADE DE ENSINO POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVO

**MQ** – MECÂNICA QUÂNTICA

**LED** – LIGHT EMITTING DIODE

**TOM** – TEORIA DOS ORBITAIS MOLECULARES

**OA** – ORBITAIS ATÔMICOS

**OM** – ORBITAIS MOLECULARES

**CLOM** – COMBINAÇÃO LINEAR DOS ORBITAIS MOLECULARES

**OP** – ORGANIZADORES PRÉVIOS

**SEA** – SEQUÊNCIAS DE ENSINO APRENDIZAGEM

**TCLE** – TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

**TALE** – TERMO DE ASSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

# Sumário

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1	DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA.....	19
1.2	JUSTIFICATIVA.....	20
1.3	PERGUNTA NORTEADORA .....	22
1.4	OBJETIVOS .....	23
1.4.1	OBJETIVO GERAL.....	23
1.4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
1.5	PRODUTO DA PESQUISA.....	23
1.6	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	24
<b>2.</b>	<b>APROFUNDAMENTO TEÓRICO .....</b>	<b>27</b>
2.1	CONTRIBUIÇÕES DA TEORIA QUÂNTICA NA ELETRÔNICA MODERNA.....	28
2.1.1	O MODELO DO ÁTOMO DE BOHR.....	29
2.1.2	ELÉTRONS COMO ONDA – CONTRIBUIÇÕES DE DE BROGLIE.....	33
2.1.3	A EQUAÇÃO DE SCHRÖDINGER .....	34
2.1.4	O SPIN E O PRINCÍPIO DE EXCLUSÃO DE PAULI .....	40
2.2	FORMAÇÃO DE BANDAS NUM SÓLIDO .....	42
2.2.1	APROXIMANDO ÁTOMOS – DESDOBRAMENTO DOS NÍVEIS DE ENERGIA .....	43
2.3	SÓLIDOS SEMICONDUTORES E PROCESSO DE DOPAGEM .....	52
2.3.1	O LED E A FOTOCÉLULA.....	57
2.3.2	A JUNÇÃO PN E O FUNCIONAMENTO DOS DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS.....	60
2.4	PRESSUPOSTOS PEDAGÓGICOS.....	64
2.4.1	A TEORIA DE APRENDIZAGEM DE AUSUBEL.....	64
2.4.2	UNIDADE DE ENSINO POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVA (UEPS) .....	69
<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA DA PESQUISA .....</b>	<b>74</b>
3.1	ABORDAGEM DA PESQUISA .....	74
3.2	INSTRUMENTOS DE COLETA DE DADOS.....	74
3.3	CONTEXTO DA PESQUISA.....	76
3.3.1	LOCAL DA PESQUISA .....	76
3.3.2	SUJEITOS PARTICIPANTES E CRITÉRIO DE INCLUSÃO .....	78
3.3.3	ASPECTOS ÉTICOS DA PESQUISA ENVOLVENDO SERES HUMANOS.....	78
3.4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	79
3.4.1	PESQUISA BIBLIOGRÁFICA.....	80
3.4.2	IDENTIFICAÇÃO DE TRABALHOS CORRELATOS.....	81
3.4.3	ELABORAÇÃO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA.....	83
3.4.4	EVOLUÇÃO DA UEPS.....	85
3.4.5	APLICAÇÃO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA EM SALA DE AULA .....	86
3.4.6	TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS OBTIDOS .....	87
3.4.6.1	COLETA DOS DADOS.....	87
3.4.6.2	CATEGORIAS DE ANÁLISE .....	88
<b>4.</b>	<b>UMA UEPS PARA A AS DE TÓPICOS DA FMC A PARTIR DOS DISPOSITIVOS SEMICONDUTORES.....</b>	<b>90</b>
<b>5.</b>	<b>APLICAÇÃO DA UEPS E COLETA DOS DADOS .....</b>	<b>108</b>
5.1	TABULAÇÃO DE DADOS .....	111
5.2	PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE DOS DADOS .....	118
<b>6.</b>	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>121</b>
6.1	APRENDIZAGEM: DESAFIOS DA APLICAÇÃO DA UEPS .....	121
6.2	APRENDIZAGEM: POSSIBILIDADES DA APLICAÇÃO DA UEPS.....	129

6.3	ANÁLISE DOS CONCEITOS ASSIMILADOS – QUESTIONÁRIO 6 .....	135
7.	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>139</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>145</b>
	<b>APÊNDICE 01: TEORIA DOS ORBITAIS MOLECULARES (TOM)</b> .....	<b>150</b>
	<b>APÊNDICE 02: PRIMEIRA VERSÃO DA UEPS CONSTRUÍDA</b> .....	<b>154</b>
	<b>APÊNDICE 03: ÚLTIMA VERSÃO ELABORADA DA UEPS – APLICADA EM SALA</b> .....	<b>156</b>
	<b>APÊNDICE 04: RECURSOS EDUCACIONAIS USADOS NAS AULAS</b> .....	<b>170</b>
	<b>APÊNDICE 05: TELAS DA SIMULAÇÃO ELABORADA PARA A UEPS</b> .....	<b>171</b>
	<b>APÊNDICE 06: TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO (TCLE)</b> .....	<b>173</b>
	<b>APÊNDICE 07: TERMO DE ASSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO (TALE)</b> .....	<b>174</b>
	<b>APÊNDICE 08: QUESTIONÁRIO 1</b> .....	<b>175</b>
	<b>APÊNDICE 09: QUESTIONÁRIO 2</b> .....	<b>177</b>
	<b>APÊNDICE 10: ATIVIDADES EXPERIMENTAIS PROPOSTAS PARA A AULA 03</b> .....	<b>179</b>
	<b>APÊNDICE 11: QUESTIONÁRIO 3</b> .....	<b>181</b>
	<b>APÊNDICE 12: QUESTIONÁRIO 4</b> .....	<b>183</b>
	<b>APÊNDICE 13: QUESTIONÁRIO 5</b> .....	<b>185</b>
	<b>APÊNDICE 14: QUESTIONÁRIO 6</b> .....	<b>187</b>
	<b>APÊNDICE 15: MAPAS CONCEITUAIS DOS ESTUDANTES</b> .....	<b>190</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A atual situação na educação pública brasileira revela uma deterioração da qualidade do ensino básico. No que tange ao Ensino da Física, este problema se deve, em parte, ao enorme distanciamento dos conhecimentos contemporâneos dos currículos escolares, à falta de estrutura das escolas e aos métodos ultrapassados de ensino.

A baixa remuneração de docentes e a precariedade dos ambientes escolares, muitas vezes desprovidos de recursos e materiais adequados, são fatores que tem, também, inibido o aprimoramento do papel dos educadores. Os próprios professores das escolas públicas se veem desmotivados. Nota-se um grande acúmulo de carga de trabalho e uma pequena quantidade de docentes que participam de programas de formação continuada.

Os alunos, por sua vez, os que de fato continuam nas escolas, apresentam-se de diversas realidades, com diversidades, dificuldades econômicas e com enormes disparidades nos níveis de conhecimento. Muitos, inclusive, já estão no mercado de trabalho para suprirem as necessidades econômicas de suas famílias; enquanto uma minoria segue cursos superiores, e se dedica às áreas de ciências e de tecnologia (TERRAZZAN, 1992).

Por outro lado, os currículos de física para formação básica são muito pobres e apresentam uma grande concentração de tópicos da física desenvolvida durante os anos de 1600 a 1900. Os conteúdos programáticos geralmente ensinados são muito semelhantes e constituídos unicamente por tópicos da Física Clássica (FC): Mecânica, Física Térmica, Ondas, Óptica e Eletromagnetismo.

Nas últimas décadas, embora tenha se discutido a inserção dos conteúdos da Física Moderna no EM, constata-se que a física newtoniana ainda domina o currículo e, muito restritamente, os questionamentos levantados pelos alunos acerca da Física Nuclear, Física Atômica, Física das Partículas Elementares e da Física do Estado Sólido são discutidos nas escolas.

Pesquisas como a de Oliveira & Vianna (2007) constataram que com a ausência da abordagem de conteúdos da FMC, corre-se o risco de aumentar cada vez mais o desinteresse pelas aulas de Física, muitas vezes observado no processo de ensino-aprendizagem. Segundo estes autores, é muito comum alunos

comentarem ou levarem para a sala de aula matérias de jornais, revistas ou reportagens que viram na televisão sobre assuntos relacionados à Física, principalmente à FMC, que, por serem atuais e estarem presentes no seu dia a dia, despertam maior interesse sobre os fenômenos envolvidos, o que pode potencializar a aprendizagem.

No entanto, o que se tem notado é que o currículo de Física do EM tem tido grandes dificuldades para acompanhar os avanços científicos e tecnológicos das últimas décadas (GRIEBELER & MOREIRA, 2012). Os problemas encontrados nas escolas brasileiras e apontados por diversos autores ultrapassam as preocupações dos investigadores para incorporação de novos conteúdos no Ensino Médio.

Além dos professores passarem boa parte do ano letivo trabalhando conteúdos da Física Clássica – bastante valorizados e requisitados pelos currículos escolares e pelos processos seletivos (vestibulares); a falta de experiência e preparo de professores, o alto grau de complexidade das teorias, a situação precária encontrada nas escolas públicas como desmotivação de estudantes e professores, ausência de laboratórios e outros recursos imprescindíveis para o ensino de Física, dificultam a implementação desses assuntos.

Há, com isso, uma defasagem enorme entre as inovações do mundo dos alunos e o mundo da escola. No mundo dos alunos, por exemplo, o que se destaca são os desenvolvimentos científicos e tecnológicos, enquanto nas escolas o computador sequer é utilizado. Segundo Sanches (2006),

o que vemos na situação de ensino é que o aprendizado de Física não tem cumprido essa missão de estimular os jovens, ao contrário, os alunos estão cada vez mais desinteressados pelos conteúdos que lhes são apresentados em sala de aula. (SANCHES, 2006, p. 89)

Alguns trabalhos como o de Greca & Moreira (2014) indicam a importância em relacionar fenômenos físicos com o funcionamento de aparelhos presentes no nosso dia a dia. O que se tem notado é que; enquanto muitos alunos passaram a ter acesso aos mais variados equipamentos eletrônicos como celulares, videogames, computadores, *tablets*, dentre outros; os assuntos da Física Moderna e Contemporânea (FMC), imprescindíveis para o desenvolvimento desses equipamentos pouco são trabalhados em sala de aula (SOARES, PAULO, &

MOREIRA, 2008). Assim, enquanto os avanços tecnológicos têm ocorrido de forma frenética, a educação básica parece ter ficado estagnada.

Outros trabalhos produzidos no Brasil como os de Ostermann & Moreira (2000), Kessler (2008), e Ostermann, Prado, & Ricci (2008), também têm destacado, que além do problema de formação docente e da desatualização do currículo, a inadequação dos materiais didáticos que são direcionados às instituições públicas, vêm favorecendo ainda mais o distanciamento dos estudantes em formação e que muitas vezes necessitam compreender áreas científicas.

## 1.1 Delimitação do Problema

O desinteresse dos estudantes, um fato banalizado nos discursos entre docentes de escolas públicas e privadas espalhadas pelo país, pode estar relacionado com os objetivos e métodos ultrapassados de ensino. Segundo Moreira (2014)

o ensino da Física na educação contemporânea é desatualizado em termos de conteúdos e tecnologias, centrado no docente, comportamentalista, focado no treinamento para as provas e aborda a Física como uma ciência acabada, tal como apresentada em um livro de texto. (MOREIRA, 2014. p.2)

Ou seja, o Ensino de Física é tradicionalmente oferecido pelas escolas através da grande preocupação com os testes de vestibulares, matematização excessiva e desarticulada com os conteúdos da Física; e, acima de tudo, esses conteúdos estão cada vez mais distantes das situações vividas pelos alunos (SILVA & ALMEIDA, 2011). A prática pedagógica descontextualizada e desvinculada da realidade dos alunos corrobora ainda mais para o afastamento dos jovens do contexto escolar.

Em muitos casos, os conteúdos escolares são vistos pelos alunos como instrumentos que não contribuem eficazmente para melhoria de suas vidas. Principalmente quando abordados de forma apenas expositiva e unidirecional, as informações passadas tornam-se obsoletas e desinteressantes por esta geração fortemente ligada à tecnologia. Não é difícil encontrar, por exemplo, uma grande quantidade de estudantes que desviam seus olhares para os novos celulares ou *smartphones* em salas de aulas por estes tornarem-se mais atrativos que a dinâmica escolar.

Contraditoriamente, muitos alunos de EM já vem tendo acesso a vários tipos de equipamentos eletrônicos como computador, videogames, celulares, e outros dispositivos que utilizam cada vez mais tecnologias avançadas que somente são explicadas por teorias, leis e princípios da FMC.

O mais intrigante é que estes dispositivos somente puderam ter sido comercializados com o vertiginoso desenvolvimento da eletrônica, com a descoberta de novos materiais usados hoje na fabricação de chips e outros elementos miniaturizados. Todo este avanço tecnológico que mudou, definitivamente, a realidade humana, contribuindo para melhorias em diversas áreas como transporte e telecomunicação, é produto de uma grande revolução que a FMC provocou no século passado. Segundo Sanches (2006),

com base em seus princípios [da FMC], surgiram tecnologias cuja importância se destaca no dia-a-dia, tais como o transistor, essencial nos computadores; o laser, utilizado nas telecomunicações e em tratamentos médicos; as usinas nucleares, com seus benefícios e riscos associados etc. (SANCHES, 2006, p. 11)

Este tema, portanto, deve ser recorrente em qualquer discussão que envolva tecnologias modernas, embora o que se tenha percebido é que o Ensino de Física não tem acompanhado o desenvolvimento das novas tecnologias em suas práticas pedagógicas. Indubitavelmente, esta situação é inaceitável em um século no qual ideias revolucionaram a ciência totalmente e as novas formas do pensar científico.

Mesmo que a abordagem dos conteúdos da FMC seja feita de forma sucinta, ela deverá ser considerada pelos professores. Boa parte das teorias modernas merecem destaque no Ensino Médio, principalmente quando, ao serem abordados em sala de aula, possam ser relacionados com a vida cotidiana dos estudantes.

## **1.2 Justificativa**

Devido aos impressionantes efeitos que a FMC tem sobre a tecnologia moderna atual, torna-se recomendável um estudo cada vez mais cedo dos conhecimentos básicos desta “Nova Física” para formação de cidadãos com olhar investigativo sobre o mundo real e capazes de progredir em estudos ainda mais complexos. Segundo Pena (2006) *apud* Ostermann et al (1998)

são inúmeras as razões para a introdução de tópicos de física contemporânea na escola média. Dentre elas: despertar a curiosidade dos estudantes e ajudá-los a reconhecer a Física como um empreendimento humano e, portanto, mais próxima dos estudantes; estabelecer o contato dos alunos com as ideias revolucionárias que mudaram totalmente a Ciência do século XX; atrair jovens para a carreira científica, futuros pesquisadores, professores. (PENA, 2006, *apud* OSTERMANN et al, 1998. p.1)

Muitas são as novas tecnologias que são alicerçadas em fundamentos da Física Contemporânea (instrumentos de GPS, modernos telefones celulares, aparelhos usados na medicina, como Raios-X, Lasers, dentre outros). O funcionamento do transistor e do laser, bem como o de vários outros dispositivos eletrônicos e opto-eletrônicos, apenas são compreendidos se alguns conceitos estabelecidos a partir do século XX forem utilizados (SANCHES, 2006). A corrente elétrica ou fotocorrente estabelecida a partir da incidência da luz em células construídas de materiais semicondutores, por exemplo, somente pôde ser melhor compreendida com o advento da Mecânica Quântica (MQ).

Esta Mecânica que descreve o comportamento de partículas subatômicas trouxe novidades conceituais que não somente se distanciam da Física Clássica, como da física do senso comum (PINTO & ZANETIC, 1999). Resultados inesperados foram encontrados das explorações realizadas do mundo microscópico, revelando anomalias que os cientistas não conseguiam explicar com base em noções clássicas. As tentativas de explicar o movimento de elétrons na estrutura dos materiais semicondutores, por exemplo, a partir da teoria clássica da luz e da matéria, mostraram-se infrutíferas.

As implicações surgidas com as hipóteses de Albert Einstein sobre a luz, aliadas às primeiras ideias sobre quantização de energia de Max Planck, marcam o início de uma reestruturação do pensamento físico e filosófico que tivera seu começo no início do século XX. A Física Quântica e sua nova linguagem a nível microscópico, conseguiu descrever satisfatoriamente o comportamento dos elétrons em átomos isolados e arranjos de muitos átomos, ao considerar a natureza quântica da matéria e o comportamento ondulatório de partículas subatômicas. Além disso, conceitos da Física Clássica como localidade, trajetória e determinismo tiveram que ser revistos.

Como já foi dito, no momento atual, há uma certa tendência em se pensar a atualização dos programas de ensino de física com a inclusão dos tópicos da FMC. A

preocupação dos investigadores, no entanto, é com os procedimentos metodológicos e educacionais.

Para Gil & Solbes (1993) a abordagem do professor de física deve ser construtivista no ensino de FMC. A orientação tradicional de ensino-aprendizagem, que enfatiza a simples transmissão/recepção de conhecimento, deve ser substituída por um currículo que envolve os alunos em “atividades” e os coloca em situações problematizadoras através das quais o conhecimento pode ser (re)construído.

A abordagem dos conteúdos da FMC, vistos como complexos e contra intuitivos pelos professores, deve ser feita a partir de materiais potencialmente significativos de forma que os alunos se envolvam no processo de produção do conhecimento. O uso de ambientes computacionais pode ser, por exemplo, uma ferramenta importante para facilitar a aprendizagem. Para Soares, Paulo & Moreira (2008)

as aulas onde se utilizam simulações têm uma função fundamental no processo de ensino-aprendizagem, pois a utilização de simulações em computadores propicia aos alunos a possibilidade de vivenciar experiências de modo virtual, algumas das quais são impossíveis de se realizar em laboratórios comuns (...) As simulações despertam o interesse dos alunos (...) (SOARES, PAULO & MOREIRA, 2008, p. 61)

O desafio é motivar o uso de uma metodologia adequada que permita a inclusão dos alunos através da utilização de recursos que possam despertar o interesse pela a aprendizagem de temas da FMC e pelo desenvolvimento de uma série de habilidades de forma prazerosa. Além disso, espera-se que sejam incorporados valores e atitudes do educando em atividades como discussões, leituras, observações e experimentações (KESSLER, 2008).

### **1.3 Pergunta Norteadora**

Pelo exposto, buscou-se, nesta dissertação, responder à seguinte questão: Que desafios e possibilidades a aplicação de uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS), constituída por alguns recursos educacionais e fundamentada na Teoria de Aprendizagem de Ausubel (MOREIRA, 2011a) pode apresentar para a Aprendizagem Significativa de tópicos da FMC para estudantes que estão cursando o 3º ano do Ensino Médio (EM)?

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo geral**

Promover a Aprendizagem Significativa de conceitos da Física Quântica (FQ) como Quantização, Dualidade e Teoria de Bandas, por parte de alunos do 3º Ano do Ensino Médio (EM) através da proposta e aplicação de uma UEPS (MOREIRA, 2011b) constituída por vários recursos educacionais e fundamentada na Teoria de Aprendizagem de Ausubel.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Elaborar uma UEPS utilizando recursos didáticos como simulações, vídeos, animações e imagens;
- Aplicar a UEPS numa turma de 3º ano do Ensino Médio visando a Aprendizagem Significativa de conceitos da FMC como Quantização, Dualidade e Teoria de Bandas;
- Analisar as contribuições desta estratégia na incorporação de novos significados na estrutura cognitiva dos estudantes;
- Destacar os desafios e possibilidades da implementação da UEPS em sala de aula.

## **1.5 Produto da Pesquisa**

A fim de contribuir para o processo de ensino-aprendizagem da Física Moderna e Contemporânea no ensino médio, no sentido da incorporação de novos significados, propõe-se uma Sequência Didática (SD), referida por Moreira (2011b) como uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS). Sustentada pela Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel (MOREIRA, 2011a), esta SD foi implementada numa turma de 3ª série do Ensino Médio de uma instituição pública de ensino no ano de 2015. Propomos uma SD diferenciada por considerarmos, em sua construção, aspectos que relacionem os referenciais epistemológicos, pedagógicos e metodológicos para compreensão de conceitos científicos da FMC.

Uma das principais motivações para a proposta foi a de propiciar o contato dos estudantes com o conhecimento construído pela ciência no século XX a partir de uma intervenção em sala de aula que estivesse aliada à dispositivos tecnológicos, frequentemente e facilmente acessíveis por estes jovens. Partimos da ideia de que estes apresentam concepções alternativas acerca destes fenômenos e, portanto, podemos considerá-las como ponto de partida para a problematização de conteúdos mais amplos e inclusivos que têm suporte em tópicos mais específicos da Teoria Quântica. Esta hipótese, sustentada pela Teoria de Aprendizagem Significativa de David Ausubel, foi imprescindível para construção da UEPS.

Os conteúdos e conceitos básicos da Física Quântica (FQ) foram explorados em sala de aula através de recursos didáticos como animações, simulações e experimentos que contemplassem as novas tecnologias como LEDs e painéis fotovoltaicos. O objetivo foi o de buscar por evidências da Aprendizagem Significativa de conceitos da FQ por parte de alunos do EM através da UEPS desenvolvida, apontando para o sucesso e as dificuldades da sua implementação no ensino.

## **1.6 Estrutura da Dissertação**

Como o Efeito Fotovoltaico (EF) e a Eletroluminescência estão diretamente relacionados com alguns aspectos da Física Quântica, como o tratamento quântico de partículas microscópicas, que descreve a formação de bandas em sólidos semicondutores, iniciamos o Capítulo 2 com as contribuições das teorias que são os alicerces para a compreensão destes fenômenos.

A Seção 2.1 apresenta boa parte das contribuições da FMC desde o momento em que as atenções dos cientistas do século XX voltaram a destacar o comportamento corpuscular da luz e a ideia de quantização como hipótese fundamental para explicação de novos fenômenos que surgiam. Preferimos destacar o modelo de Bohr por este fornecer subsídios para a compreensão dos saltos quânticos dos elétrons entre as bandas de condução e de valência nos sólidos semicondutores.

Ainda na Seção 2.1, discutimos o tratamento do átomo de Schrödinger para átomos de um elétron. Partimos da ideia de De Broglie, que passou a considerar o comportamento ondulatório das partículas subatômicas. Este tratamento foi

expandido para átomos de muitos elétrons para que se pudesse compreender a formação de bandas dos sólidos.

Na Seção 2.2 apresentamos as duas abordagens destacadas no trabalho de Romano (2003): A Teoria dos Orbitais Moleculares (TOM) e outro tratamento que parte do comportamento ondulatório dos elétrons submetidos a um potencial periódico do sólido cristalino. Destacamos também o modelo de Kronig-Penney.

As características dos sólidos semicondutores, suas principais propriedades, o processo de dopagem, e a importância da junção PN foram discutidas na Seção 2.3. No final desta seção destacamos o movimento dos portadores de carga nos semicondutores e diferenciamos o Efeito Fotovoltaico do fenômeno da Eletroluminescência, fenômenos que ocorrem nos dispositivos semicondutores.

Na Seção 2.4 apresentamos os pressupostos pedagógicos considerados para a elaboração da UEPS. Inicialmente evidenciamos os principais aspectos da Teoria de Aprendizagem de David Ausubel e, por fim, apresentamos o modelo de Sequência Didática (UEPS) idealizada por Marco Antonio Moreira.

No Capítulo 3 foi discutido a metodologia da pesquisa. Nas primeiras seções destacamos a abordagem da pesquisa e os instrumentos usados na coleta de dados. Em seguida, apresentamos o contexto, caracterizamos a instituição de ensino onde foi aplicada a UEPS. Na Seção 3.4 deste capítulo, evidenciamos os procedimentos metodológicos da pesquisa, apresentando o processo de elaboração do produto educacional (UEPS) nas subseções.

No Capítulo 4 apresentamos a UEPS com a maior riqueza de detalhes possível, elencando os aspectos considerados para sua elaboração.

O Capítulo 5 possui o passo a passo da aplicação da UEPS em sala de aula com destaque no processo de coleta de dados com a utilização dos instrumentos da pesquisa. Apresentamos, também neste capítulo, os procedimentos para análise dos dados coletados.

No Capítulo 6 foi feita a análise dos dados (após tabulação) e a discussão dos resultados obtidos. Evidenciamos as contribuições e limitações da UEPS elaborada e aplicada em sala de aula.

Os Apêndices contêm as versões das Unidades de Ensino elaboradas, os recursos educacionais usados nas aulas, a estrutura da simulação desenvolvida para este trabalho, os questionários aplicados na intervenção, os termos usados para

consentimento dos sujeitos envolvidos e algumas versões dos mapas conceituais elaboradas pelos estudantes.

## 2. APROFUNDAMENTO TEÓRICO

As descobertas da Física da Matéria Condensada<sup>1</sup> no século XX impulsionaram o desenvolvimento de novos dispositivos que revolucionaram a eletrônica. Novas propriedades e fenômenos passaram a ser estudados a rigor possibilitando a construção de novos materiais artificiais tornando os equipamentos cada vez mais miniaturizados.

O que se vê nos dias atuais é o enorme impacto que estas novas descobertas tiveram nas mais diversas áreas como nas telecomunicações, transportes, computação, e uma série de prêmios Nobel dados a pesquisadores da área. Além disso, novas técnicas para fabricação de novos dispositivos surgiram, possibilitando obtenção de estruturas artificiais inimagináveis nas últimas décadas.

Os semicondutores, por exemplo, são materiais com propriedades diferenciadas muito utilizados na fabricação de componentes eletrônicos tais como diodos, transístores e outros com diversos graus de complexidade tecnológica, facilmente encontrados em microprocessadores e nanocircuitos.

Para estudarmos estes materiais necessitamos substituir o modelo associado à condução elétrica, com base na Física Clássica, por outro, agora considerando a Física Quântica. Isto representa o limite para um dos modelos da Física Clássica. Frequentemente estamos familiarizados a lidar com objetos materiais clássicos que possuem quantidade de movimento e trajetórias bem definidas e com manifestações dos fenômenos ondulatórios que podem ser medidos e observados em simples experimentos.

No entanto, muitas tecnologias da atualidade, como por exemplo os painéis fotovoltaicos e os LEDs, somente são explicadas através das teorias da Física Quântica que estabelecem relações de probabilidade para localização de partículas microscópicas e encara a energia de um sistema com valores quantizados.

Nestes painéis, ou células fotovoltaicas, as partículas de luz (fótons) e seus pacotes de energia, interagem com os elétrons da rede cristalina para produção de corrente elétrica. Nos LEDs, a emissão de fótons na junção de dois diferentes

---

<sup>1</sup> Física da Matéria Condensada ou Física do Estado Sólido visa a previsão e a compreensão das propriedades físicas coletivas dos arranjos atômicos. Estudo dos fenômenos em Física da Matéria Condensada requer a utilização conjunta dos conceitos básicos de mecânica quântica, física estatística e eletromagnetismo.

materiais semicondutores dopados é explicada com os saltos quânticos dos elétrons entre bandas – a banda de condução e a banda de valência.

Além disso, como veremos a seguir, o próprio conceito de bandas de energia só foi possível com o desenvolvimento da Teoria Quântica. Nas próximas sessões serão discutidas algumas teorias e descobertas da Física que contribuíram para a compreensão do funcionamento destes dispositivos.

## **2.1 Contribuições da teoria quântica na eletrônica moderna**

A mecânica quântica é a ferramenta fundamental no projeto de dispositivos semicondutores como os diodos, LEDs e fotocélula. Sua teoria projetou classes inteiras de dispositivos, denominados dispositivos quânticos, com base nos níveis de energia quantizados (KNIGHT, 2012). O termo quantização é usado em referência a algum método teórico desenvolvido com o objetivo de tornar uma teoria consistente com as premissas básicas da mecânica quântica.

Em 1899, Max Planck sugeriu que a troca de energia entre a radiação e os "osciladores" num corpo negro (radiador de cavidade), se dá de maneira quantizada. A hipótese central por trás de sua nova teoria foi a suposição de que a energia eletromagnética poderia ser emitida somente em pacotes de energia discreta. Em outras palavras, a energia só poderia ser um múltiplo de uma unidade  $E = h \cdot \nu$ , onde  $h$  é a constante de Planck, também conhecida como "quantum de ação de Planck" e  $\nu$  é a frequência da radiação.

Em 1905, Albert Einstein publicou a teoria do efeito fotoelétrico. Parecia que a única explicação possível para o efeito fotoelétrico era a existência de partículas de luz chamadas fótons. Mais tarde, Niels Bohr mostrou que os átomos também eram quantizados, no sentido de que eles só poderiam emitir quantidades discretas de energia.

Anterior ao modelo de Bohr, o modelo mais aceito era o do físico britânico Ernest Rutherford que, em 1911, descobriu a existência do núcleo atômico. A partir das observações realizadas por ele e por sua equipe, Rutherford propôs um modelo atômico no qual o átomo era quase que totalmente vazio, com um minúsculo núcleo extremamente denso e positivo e uma região externa, a eletrosfera, formada por

partículas negativas – os elétrons –, que giram em torno do núcleo descrevendo órbitas helicoidais.

Este modelo “planetário” do átomo, entretanto, tinha, do ponto de vista teórico-clássico, um sério ponto fraco. De acordo com a teoria eletromagnética, qualquer carga em movimento acelerado deve emitir radiação e, portanto, perder continuamente energia em forma de ondas eletromagnéticas. O elétron, então em órbita, acabaria por perder toda a sua energia e colapsar para o núcleo. Além disso, um núcleo formado apenas por partículas positivas deveria se desintegrar, pois as cargas elétricas de mesmo sinal se repelem mutuamente. Portanto, o modelo atômico proposto por Rutherford era instável.

### 2.1.1 O Modelo do átomo de Bohr

O problema para a instabilidade do átomo de Rutherford somente foi solucionado com as considerações de Niels Bohr que, pela primeira vez, descreveu um modelo atômico com a adição das regras de quantização de energia de Max Planck. Em seu modelo semi-clássico lançado no ano de 1913 em seu artigo “*Sobre a constituição de átomos e moléculas*”, Bohr postulou que os elétrons nos átomos estão confinados em certos níveis energéticos e órbitas estáveis não radiantes, conhecidos como estados estacionários (SERWAY et al, 2005)

Segundo Eisberg & Resnick (1997), os postulados nos quais o modelo de Bohr está baseado são:

1. Um elétron em um átomo se move em uma órbita circular em torno do núcleo sob influência da atração coulombiana entre o elétron e o núcleo, obedecendo às leis da mecânica clássica.

2. Em vez da infinidade de órbitas que seriam possíveis segundo a mecânica clássica, um elétron só pode se mover em uma órbita na qual seu momento angular orbital  $L$  é um múltiplo inteiro de  $\hbar$  (a constante de Planck dividida por  $2\pi$ ).

3. Apesar de estar constantemente acelerado, um elétron que se move em uma dessas órbitas possíveis não emite radiação eletromagnética, portanto sua energia total  $E$  permanece constante.

4. É emitida radiação eletromagnética se um elétron, que se move inicialmente sobre uma órbita de energia total  $E_i$ , muda seu movimento descontinuamente de forma

a se mover em uma órbita de energia total  $E_f$ . A frequência da radiação emitida  $\nu$  é igual à quantidade  $(E_i - E_f)$  dividida pela constante de Planck  $h$ .

É no segundo postulado que Bohr refere-se à quantização. Sua ideia fundamental partiu da percepção de que a teoria clássica não poderia explicar a estabilidade do átomo em seu estado normal, com o elétron orbitando o núcleo sem a emissão de radiação. Passou então a admitir a existência de estados estacionários com determinadas características (NUSSENSWEIG, 1996).

As órbitas permitidas para os elétrons deveriam então satisfazer à condição de que o momento angular orbital de um determinado elétron ao redor do núcleo é um múltiplo inteiro de  $\hbar$ . Isto é,

$$L = n \cdot \hbar \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad [1]$$

Considerando também que para um elétron em órbita:

$$L = m_e \cdot v \cdot r \quad [2]$$

A igualdade destas últimas equações indica que os raios das órbitas correspondem à quantização do momento angular em unidades de  $\hbar$ . Conseqüentemente, esta quantização também evidencia a discretização da energia total, mas com uma equação de quantização da energia diferente da de Planck (EISBERG & RESNICK, 1997).

Além disso, a partir de uma série de simplificações e aproximações relativamente úteis, pôde-se compreender as relações da radiação eletromagnética com a quantização dos níveis de energia estabelecidos por Bohr, como indica o quarto postulado.

Considerando este postulado, quando um elétron passa de um estado “estacionário” de energia  $E_i$  para outro estado  $E_f$ , com  $E_i > E_f$ , a diferença de energia corresponde à emissão de um fóton de frequência dada por

$$\nu_{i \rightarrow f} = (E_i - E_f) / h \quad [3]$$

Pode-se inferir que o elétron em determinado estado de energia só pode absorver um fóton da frequência exata necessária para produzir um salto do estado de energia mais elevado (SERWAY et al, 2005).

Pode também ocorrer o processo inverso. Com a absorção de um fóton com determinada frequência o elétron salta de  $E_f$  para  $E_i$ .

Usando estes quatro postulados, pode-se calcular os níveis de energia permitidos e as frequências de emissão para o átomo de hidrogênio. Vale destacar, que embora seu modelo apresentasse êxito para descrever o átomo de hidrogênio, fornecendo também as bases para uma nova mecânica, não era capaz de explicar detalhes dos espectros de átomos multieletrônicos.

A expressão para a quantização da energia total para o átomo de hidrogênio pode ser obtida a partir da condição de estabilidade mecânica do elétron (EISBERG & RESNICK, 1997):

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r^2} = m \frac{v^2}{r} \quad [4]$$

onde  $V$  é a velocidade do elétron em sua órbita,  $r$  é o raio da órbita e  $Z$  é o número atômico (no caso do átomo de hidrogênio,  $Z=1$ )

Considerando a quantização do momento angular  $L$ , pode-se obter uma expressão para o raio da órbita do elétron e, conseqüentemente, para sua velocidade orbital:

$$V = \frac{n\hbar}{mr} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{n\hbar}$$

com  $n=1,2,3,\dots$  [5]

Como a energia total do elétron é dada pela soma da energia cinética e a potencial:  $E = K + U$ , substituindo a expressão da velocidade, obtém-se a equação de quantização da energia total do elétron:

$$E = -\frac{mZ^2e^4}{(4\pi\epsilon_0)^2 2\hbar^2 n^2}$$

com  $n=1,2,3,\dots$  [6]

Substituindo as constantes para o átomo de hidrogênio, pode-se também obter uma expressão mais simplificada para a quantização da energia total:

$$E = -\frac{13,6}{n^2} \text{ eV}$$

com  $n=1,2,3,\dots$  [7]

Os números inteiros  $n$  correspondem aos valores discretos ou quantizados da energia do átomo e são denominados números quânticos.

O estado em que o elétron tem a menor energia (para  $n=1$ ) é denominado estado fundamental (não radiante). Outros estados ( $n>1$ ) em que o elétron pode sofrer transição para um estado mais energético são denominados estados excitados. Assim, para cada transição que o elétron sofre para estados menos energéticos, é emitida radiação eletromagnética com o comprimento de onda que depende da energia perdida. O modelo de Bohr fornece, então, subsídios para explicar as propriedades do espectro de absorção dos átomos de um elétron.

Como o elétron atômico deve ter uma energia total exatamente igual à energia de um dos estados de energia possíveis, o átomo pode apenas absorver quantidades discretas de energia da radiação eletromagnética incidente. Este fato conduz à ideia de considerarmos que a radiação incidente é constituída de um feixe de fótons, e que apenas podem ser absorvidos aqueles fótons cujas frequências são dadas por  $E = h\nu$ , onde  $E$  é uma das quantidades de energia discretas que podem ser absorvidas pelo átomo. O processo de absorção de radiação eletromagnética é então exatamente o inverso do processo normal de emissão, e as linhas do espectro de absorção terão exatamente os mesmos comprimentos de onda do espectro de emissão. (EISBERG & RESNICK, 1997, p.144).

A maior contribuição de Bohr foi mostrar que a descrição clássica da matéria não era satisfatória. Seus postulados selaram o início de uma importante ruptura de natureza epistemológica, contribuindo para o surgimento da Mecânica Quântica. Em particular, seus trabalhos influenciaram diretamente as ideias de Heisenberg e de Louis de Broglie, o qual, por sua vez, teve grande influência sobre Schrödinger (CARUSO, 2006)

Einstein reconheceu as importantes contribuições de Bohr para o advento da teoria quântica a partir do tratamento das órbitas eletrônicas que passou a ser tratado como um princípio quântico universal e aplicável em todos os sistemas e de maior validade que a lei da radiação de Maxwell.

No entanto, o modelo proposto por Niels Bohr apresentava uma série de inconsistências. Não esclarecia, por exemplo, como os elétrons estavam organizados nos átomos e também possuía limitações em prever comprimentos de onda de emissão e absorção para átomos com muitos elétrons. Essas e outras inadequações indicavam que esse modelo era mais uma etapa na busca de uma teoria atômica geral que explicasse não só os espectros atômicos, como também as ligações químicas e outras propriedades inerentes aos átomos.

### **2.1.2 Elétrons como onda – Contribuições de De Broglie**

Outra importante trajetória seguida por alguns cientistas na construção da Mecânica Quântica, originou-se com os trabalhos do francês Louis de Broglie, por volta de 1925. De Broglie conduziu seus estudos por analogia à natureza discreta de uma onda eletromagnética, proposta por Einstein. Assim, se um conjunto de fótons de energia  $E$  corresponde uma onda eletromagnética de frequência  $\nu = E/h$ , pode-se associar um feixe de partículas livres de massa  $m$  e mesma velocidade, um comportamento ondulatório (CARUSO, 2006).

Para De Broglie, esse comportamento dual apresentado pela luz também seria aplicado para a matéria nos casos em que a magnitude da constante de Planck não pudesse ser desprezada. Um elétron, por exemplo, poderia apresentar comportamento ondulatório regido por uma superposição de várias ondas planas monocromáticas com frequência e comprimento univocamente definidos. Esse pacote de ondas se deslocaria com uma determinada velocidade conhecida como velocidade de grupo, transportando energia associada à partícula.

Sem nenhuma evidência experimental aparente, mas fundamentado pela analogia com a equação de Einstein  $E = h \nu$  para o fóton e com algumas das ideias de sua teoria da relatividade, de Broglie postulou que o elétron é caracterizado por uma frequência  $\nu$  e comprimento de onda  $\lambda$ , relacionados com a energia e o momentum exatamente do mesmo modo que para fótons. Ele concluiu que o comprimento de onda e frequência de uma onda de matéria associada a qualquer objeto em movimento devem obedecer a relação:

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad [8]$$

onde  $p$  é o momentum de um objeto quântico e  $\lambda$  é o comprimento de onda associado à partícula. Nesta equação consegue-se observar que enquanto o momentum  $p$  corresponde à característica corpuscular,  $\lambda$  corresponde ao caráter ondulatório sugerido por de Broglie.

Este raciocínio aplicado às órbitas do modelo de Bohr, possibilitou uma maior aceitação para a quantização do momento angular e, conseqüentemente, a quantização das órbitas permitidas para os elétrons. Ou seja, as órbitas permitidas surgem porque as ondas de matéria dos elétrons interferem de maneira construtiva quando um número inteiro de comprimentos de onda cabe exatamente na órbita circular proposta por Bohr (SERWAY et al, 2005)

Em 1927, experimentos de Davisson e Germer manifestaram claramente as propriedades ondulatórias das partículas e causaram grande impressão na comunidade científica. Nos experimentos realizados, observou-se a difração de elétrons emitidos por um filamento aquecido que eram dispersados por um determinado cristal que possuía uma estrutura atômica periódica e que atuava como uma rede de difração, produzindo assim, máximos e mínimos de interferência.

Segundo Goldin & Nóvikova (1990), estas experiências demonstraram que “todas as micropartículas têm propriedades ondulatórias, de maneira que entre elas e os fótons não existe diferença essencial: tanto as partículas como os fótons são micro-objetos que possuem simultaneamente as propriedades das partículas e as propriedades das ondas” (GOLDIN & NÓVIKOV, 1990, p. 22-23). Podemos inferir, então, que assim como as ondas de alta frequências colidem como se fossem partículas muito pequenas, elétrons difratam como ondas no mundo atômico, como no interior de cristais, devido às suas dimensões e, conseqüentemente, possuem o comprimento de onda comparável, isto é, muito pequeno.

### **2.1.3 A Equação de Schrödinger**

Em uma das interpretações mais aceitas da Mecânica Quântica – a interpretação de Copenhagen – a Equação de Schrödinger é uma equação geral que pode descrever macroscopicamente e microscopicamente os fenômenos da mecânica. Sua teoria elaborada em 1925 revela uma grande importância para a ciência no que se refere ao grande número de conceitos científicos envolvidos.

Os estudos desenvolvidos por Schrödinger, Heisenberg<sup>2</sup> e outros, possibilitaram a compressão de uma grande quantidade de fenômenos que envolvem partículas elementares, átomos, moléculas e sólidos (SERWAY et al, 2005).

Nas próximas páginas descreveremos sucintamente as relações matemáticas da teoria de Schrödinger para o elétron. Em seguida, retomaremos à quantização da matéria, especificamente, no átomo de hidrogênio relacionando o comportamento da função de onda do elétron ao seu movimento em torno do núcleo.

Schrödinger tinha uma excelente formação em física matemática e logo se preocupou em desenvolver uma formulação da mecânica ondulatória para ondas de matéria de De Broglie. Seus estudos nos forneceu a forma da função de onda caso saibamos qual a força que atua sobre a partícula associada, especificando a energia potencial correspondente. A função de onda ( $\psi$ ) contém toda a informação acerca do estado de um sistema. A evolução desta função em um sistema físico é determinada por uma equação diferencial proposta por Schrödinger, a qual pode ser escrita como:

$$H\psi = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}, \quad [9]$$

em que  $H$  é o Operador auto-adjunto que representa a energia total do sistema, i.e., a soma da energia cinética mais potencial.

A Equação 9 pode ser escrita de forma mais explícita como:

$$\left[ -\frac{\hbar^2 \nabla^2}{2m} + V(\mathbf{r}, t) \right] \Psi(\mathbf{r}, t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \quad [10]$$

onde o primeiro termo da expressão representa a soma das energias cinéticas e potencial,  $m$  é a massa da partícula.  $\mathbf{r}$  representa o conjunto das três coordenadas de espaço,  $\mathbf{r} = (x, y, z)$ .

Consideremos, por exemplo uma onda plana que se propaga ao longo de  $r$ , com a seguinte forma:

$$\psi(r, t) = \psi(r) \cdot e^{-i\omega t} \quad [11]$$

---

<sup>2</sup> A abordagem de Schrödinger é denominada mecânica ondulatória e a de Heisenberg mecânica matricial. Neste trabalho utilizaremos apenas a abordagem de Schrödinger.

Esta é a forma matemática para uma função de onda dependente do tempo para uma partícula de Energia  $E = \hbar\omega$ .

Portanto, para uma função espacial  $\psi(\mathbf{r})$  e  $U$  independente do tempo, a equação de Schrödinger tem, abreviadamente a seguinte forma:

$$H\psi(\mathbf{r}) = E\psi(\mathbf{r}), \quad [12]$$

Em muitos problemas de Mecânica Quântica, o que se pretende é calcular os valores possíveis da energia do sistema,  $E$ , em sistemas onde a equação de Schrödinger independente do tempo é suficiente para resolver os chamados sistemas estacionários.

Para uma partícula livre (não-relativística) em trajetória unidimensional, o tratamento matemático para descrever seu movimento é bastante simples. Uma partícula livre de ação de forças possui o potencial  $U(x) = 0$  e, portanto, apenas o termo da energia cinética aparece na Equação de Schrödinger.

Vamos retomar o problema do átomo de hidrogênio, considerando também o núcleo atômico estático e maciço onde orbita um elétron de massa  $m$  energia  $E$ . Este foi o primeiro sistema tratado por Schrödinger com a sua teoria da Mecânica Quântica (EISBERG & RESNICK, 1997). Admitindo que a interação entre o próton e o elétron fosse dada pela energia potencial de interação eletrostática coulombiana, Schrödinger determinou o espectro de energia do átomo de hidrogênio bem como suas autofunções. Vale destacar que a constante  $\hbar$  relaciona-se com a constante de Planck segundo a expressão:

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} \quad [13]$$

O sistema de um núcleo carregado positivamente e um elétron carregado negativamente, movendo-se em torno desse núcleo sob a influência da atração coulombiana mútua é descrito por coordenadas compatíveis com o seu caráter tridimensional. A adoção do sistema de coordenadas esféricas polares, por exemplo, pode reduzir as dificuldades matemáticas ao solucionar a equação de Schrödinger. A energia potencial para o átomo de hidrogênio será dada por:

$$U = U(r) = \frac{-Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r} \quad [14]$$

Como o átomo de hidrogênio tem simetria esférica, então, será conveniente trabalharmos com Coordenadas Polares Esféricas  $(r, \theta, \varphi)$ . Com a aplicação de certas regras do cálculo diferencial, mostra-se que a equação de Schrödinger pode ser reescrita como:

$$-\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 \psi(r, \theta, \varphi) + U(r)\psi(r, \theta, \varphi) = E\psi(r, \theta, \varphi) \quad [15]$$

Nesta equação, a constante  $\mu$  é a massa reduzida do elétron ao considerar a influência do movimento do núcleo, muitas vezes desprezada.  $\theta, \varphi$  são os ângulos polar e azimutal do sistema de coordenadas assumido. O operador  $\nabla^2$  é denominado operador laplaciano em coordenadas esféricas que tem a seguinte forma:

$$\nabla^2 = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right) \quad [16]$$

Como o potencial coulombiano depende apenas da variável  $r$ , utilizando a técnica de separação de variáveis, é possível encontrar soluções para a equação de Schrödinger da forma:

$$\psi(r, \theta, \varphi) = R(r)\Theta(\theta)\Phi(\varphi) \quad [17]$$

Esta técnica permite separar a equação diferencial parcial de três variáveis em três equações diferenciais ordinárias nas variáveis  $r, \theta, \varphi$ . Não nos preocuparemos aqui em desenvolver e solucionar a equação de Schrödinger para essas três variáveis. Optaremos apenas em discutir os três números quânticos obtidos da sua solução.

A energia associada a zona onde se pode encontrar o elétron vai depender de um número quântico  $n$ , chamado de número quântico principal, e do número atômico  $Z$ :

$$E_n = -\frac{\mu e^4 Z^2}{32\pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^2 n^2} \quad \text{com } n=1,2,3,\dots \quad [18]$$

Este resultado indica a previsão para os valores permitidos para a energia total dos estados ligados do átomo de hidrogênio. Este foi, na verdade, o primeiro sistema que Schrödinger tratou, onde os autovalores de energia são os mesmos que previstos por Bohr:

$$E_n = -\frac{\mu e^4 Z^2}{32\pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^2} \frac{1}{n^2} = -\frac{13,6eV}{n^2}$$

com  $n=1,2,3,\dots$  [19]

A função de onda total  $\psi(r, \theta, \varphi)$  depende de  $n$ ,  $\ell$ , e  $m_\ell$ , ficando:

$$\psi_{n\ell m_\ell}(r, \theta, \varphi) = R_{n\ell}(r) Y_{\ell m_\ell}(\theta, \varphi) \quad [20]$$

Embora os autovalores da energia do átomo de hidrogênio dependam somente do número quântico  $n$ , as autofunções dependem de outros três números quânticos. Segundo Alcácer (2007), os outros dois números quânticos são o número quântico orbital  $\ell$  e o número quântico magnético  $m_\ell$ , que correspondem à quantização do momento angular e, portanto, são números quânticos associados às coordenadas  $\theta$  e  $\varphi$ . Os valores de  $n$ ,  $\ell$  e  $m_\ell$  satisfazem as seguintes condições:

$$\begin{aligned} n &= 1, 2, 3, 4, \dots \\ \ell &= 0, 1, 2, 3, \dots, n-1 && \text{para cada valor de } n \\ m_\ell &= -\ell, -\ell+1, \dots, 0, 1, \dots, \ell-1, \ell && \text{para cada valor de } \ell \end{aligned}$$

Estas condições mostram que para um dado valor de  $n$  existem geralmente vários valores diferentes possíveis para  $\ell$  e  $m_\ell$ . A forma das autofunções além de depender dos três números quânticos, podem diferenciar-se entre si, mas correspondendo ao mesmo autovalor  $E_n$ . Dizemos então que as autofunções são degeneradas. A degenerescência é consequência de certas propriedades da função energia potencial que descreve o sistema (EISBERG & RESNICK, 1997).

A Figura que segue e contém os valores possíveis para  $\ell$  e  $m_\ell$ , para  $n < 4$ :

$n$	1	2		3		
$l$	0	0	1	0	1	2
$m_l$	0	0	-1, 0, +1	0	-1, 0, +1	-2, -1, 0, +1, +2
Número de autofunções degeneradas para $l$	1	1	3	1	3	5
Número de autofunções degeneradas para cada $n$	1	4		9		

**Figura 1.** Tabela de valores possíveis de  $l$  e  $m_l$  para  $n = 1, 2, 3, \dots$  (Eisberg & Resnick, 1997, p. 311)

Geralmente são atribuídas determinadas letras para os níveis de energia associados ao número quântico principal,  $n$ . Denomina-se camada K, para  $n=1$ , camada L, para  $n=2$ , camada M, para  $n=3$ , etc.

Às orbitais (região do espaço onde o elétron pode mover-se) associadas ao número quântico  $l$  dão-se os nomes de s (de sharp), p (de principal), d (de diffuse), f (de fundamental) etc., respectivamente para  $l = 0, 1, 2, 3$ , etc. O termo orbital referido, representa uma região provável de encontrar um elétron num elemento de volume resultante de uma densidade de probabilidade. A variação angular da densidade de probabilidades pode ser representada de várias maneiras diferentes e indica que o elétron não é caracterizado por uma órbita no sentido clássico, mas sim por uma densidade de probabilidade.

Esta região é, na verdade, parte da interpretação física da função de onda. O quadrado do módulo da função de onda resulta na probabilidade de encontrar o elétron nesta região. Esta interpretação física foi proposta por Max Born em 1925 e valeu-lhe o prêmio Nobel em 1954. Ele inspirou-se, segundo Caruso (2006), em uma “interpretação sugerida por Einstein, segundo a qual o quadrado das amplitudes das ondas luminosas poderia ser visto como uma densidade de probabilidade da ocorrência dos fótons” CARUSO (2006, p. 445).

## 2.1.4 O spin e o Princípio de Exclusão de Pauli

Como vimos, um dos problemas mais importantes tratados pela mecânica quântica de Schrödinger foi o átomo de Hidrogênio. A teoria de Schrödinger mostrou-se totalmente compatível com o modelo proposto por Bohr, para o átomo monoelétrônico, no que se refere aos autovalores de energia. No entanto, o modelo de Bohr falha completamente na explicação dos níveis de energia para átomo de muitos elétrons, ao contrário da teoria de Schrödinger que se adaptou muito bem aos átomos multieletrônicos.

Vale destacar que a teoria de Schrödinger, tratada na seção anterior, necessita de um ingrediente fundamental para descrever os átomos multieletrônicos e as propriedades dos sólidos: o Spin<sup>3</sup>. Ou seja, além de massa e carga, o elétron tem um spin, associado a um novo grau de liberdade intrínseco para o elétron, como alguns experimentos indicaram.

Em sistemas onde existe mais de um elétron, a descrição para cada estado eletrônico é possível com um conjunto adequado dos quatro números quânticos:  $n$ ,  $\ell$ ,  $m_\ell$  e  $m_s$ . Neste sentido, como aponta Serway et al (2005), duas questões importantes podem surgir: Quantos elétrons em um átomo podem possuir os mesmos quatro números quânticos? Poderão estar no mesmo estado?

As respostas para estas questões foram dadas por Pauli em 1925 ao ter encontrado a solução para a estrutura eletrônica dos átomos. Seu famoso princípio de exclusão requer que dois elétrons de um certo sistema não possam ocupar o mesmo estado.

Isto quer dizer que o conjunto de quatro números quânticos de um elétron em um sistema não pode ser igual ao de outro. [...] quando dois elétrons possuem os mesmos números quânticos  $n$ ,  $\ell$  e  $m$ , devem ter spins diferentes. Assim, um dado orbital atômico pode conter, no máximo, dois elétrons com a restrição de que seus spins sejam opostos ou antiparalelos. (CARUSO, 2006, p. 565).

Vale destacar a importância deste princípio e sua compatibilidade com a distribuição eletrônica dos elementos químicos que se conhece até então. Se este não fosse válido, todos os elétrons poderiam ocupar simultaneamente o estado atômico

---

<sup>3</sup> O spin é fundamentalmente não clássico e, portanto, é inadequado a expressão “girar em torno de si próprio”.

1s (de menor energia) e o comportamento químico dos elementos seria drasticamente distinto do que se conhece.

Outra questão que deve ser considerada para a descrição quântica completa dos sistemas referidos até aqui é a descrição da natureza quântica de partículas idênticas tais como os elétrons. Na Física Clássica, partículas idênticas podem ser distinguidas uma das outras através de procedimentos que não afetam seu comportamento (EISBERG & RESNICK, 1997). No entanto, na Física Quântica, elétrons são indistinguíveis porque o princípio de incerteza impede a observação contínua do movimento dos elétrons sem alterar seu comportamento. De forma equivalente, podemos dizer que as funções de onda de dois elétrons, quando superpostas em seus estados quânticos, impedem a distinguibilidade destas partículas.

Sabemos que a descrição de sistemas quânticos é feita a partir das autofunções. Embora estas não sejam acessíveis, como a função densidade de probabilidades, é possível escrever uma autofunção que satisfaça a equação de Schrödinger independente do tempo e que leve em conta o princípio da indistinguibilidade de partículas idênticas. Neste caso, duas possíveis combinações podem ser consideradas:

$$\psi_S = \frac{1}{\sqrt{2}} [\psi_\alpha(1)\psi_\beta(2) + \psi_\beta(1)\psi_\alpha(2)] \quad [21]$$

$$\psi_A = \frac{1}{\sqrt{2}} [\psi_\alpha(1)\psi_\beta(2) - \psi_\beta(1)\psi_\alpha(2)] \quad [22]$$

,onde  $\alpha$  e  $\beta$  representam os estados quânticos (espacial e de spin) das partículas 1 e 2.

A autofunção  $\psi_S$  é denominada de autofunção total simétrica enquanto  $\psi_A$  é denominada de autofunção total antissimétrica.

Através destas combinações lineares de autofunções, é possível tratar o problema de partículas idênticas levando-se em conta a não violação do requisito quântico de indistinguibilidade.

Embora sejam combinações distintas, podem corresponder a um mesmo autovalor. Em outras palavras, a energia total ( $E_T$ ) de um sistema tendo uma partícula num estado quântico  $\alpha$  e outra partícula num estado quântico  $\beta$  não dependerá de

qual partícula está em qual estado, se as partículas são idênticas como indica a relação:

$$\psi_{\alpha}^{*}(1)\psi_{\beta}^{*}(2)\psi_{\alpha}(1)\psi_{\beta}(2) \rightarrow \psi_{\alpha}^{*}(2)\psi_{\beta}^{*}(1)\psi_{\beta}(1)\psi_{\alpha}(2) \quad [23]$$

$$\begin{matrix} 1 \rightarrow 2 \\ 2 \rightarrow 1 \end{matrix}$$

As autofunções fornecem uma descrição correta de um sistema constituído de duas partículas idênticas, pois satisfazem à equação de Schrödinger independente do tempo (EISBERG & RESNICK, 1997). Além disso, vale destacar que a função densidade de probabilidade do sistema não é alterada quando se trocam as coordenadas das duas partículas, como indicado.

Este enunciado (indistinguibilidade de partículas idênticas) descreve, alternativamente, o Princípio de Exclusão de Pauli: um sistema constituído de vários elétrons deve ser descrito por uma autofunção total antissimétrica de forma que todos os elétrons não ocupem o mesmo estado quântico.

## 2.2 Formação de Bandas num Sólido

A teoria dos átomos com mais de um elétron é incomparavelmente mais complexa do que a dos átomos com um só elétron. Para átomos multieletrônicos deve-se levar em conta não só a interação dos elétrons com o núcleo do átomo, como também a interação dos elétrons entre si. A função de onda de um elétron afeta todos os outros elétrons e por isto o potencial  $U$  é muito mais complexo do que o do átomo de hidrogênio. O Hamiltoniano para esses sistemas ainda é bem conhecido. A dificuldade do problema está relacionada com a solução da equação de Schrödinger, como aponta Romano (2003):

Embora a mecânica quântica possibilite o cálculo das propriedades de qualquer molécula ou cristal a partir da equação de Schrödinger, uma solução exata para sistemas multieletrônicos é inimaginável em virtude das dificuldades matemáticas impostas até mesmo aos mais capacitados recursos computacionais existentes. (ROMANO, 2003, p. 3)

As equações diferenciais que descrevem o estado destes átomos são complexas e sua forma geral não é facilmente resolvida. Entretanto, a teoria de Schrödinger fornece subsídios para solucionar estas equações, mesmo que não analiticamente, considerando-se também, é claro, alguns modelos aproximados do sistema multieletrônico.

(...) Além de sua importância histórica e intrínseca, a teoria de Schrödinger do átomo de um único elétron é de grande importância prática porque fornece os fundamentos para o tratamento da mecânica quântica dos átomos de muitos elétrons, bem como para moléculas e núcleos (EISBERG & RESNICK, 1997, p. 301).

Duas possíveis abordagens podem ser feitas se considerarmos a estrutura do sólido como uma rede cristalina de átomos. Um destes tratamentos, muito utilizado pelos Químicos, é a Teoria dos Orbitais Moleculares ou simplesmente, TOM (Apêndice 01). Esta considera as interações dos vários orbitais atômicos (OA) da estrutura resultando em diversas e possíveis combinações lineares desses orbitais.

O outro tratamento, utilizado pelos físicos, parte das ondas deslocalizadas dos elétrons de valência dos átomos da rede periódica para o cálculo dos níveis de energia. Este modelo considera o movimento livre do elétron no sólido que experimenta um potencial eletrostático constante por todo o seu volume, com exceção nas regiões superficiais. Em tais regiões os elétrons são impedidos de deixar o sólido. Assim, a aplicação da equação de Schrödinger para um elétron nesta situação assemelha-se ao problema da “partícula na caixa”, cujas soluções são muito conhecidas na Mecânica Quântica.

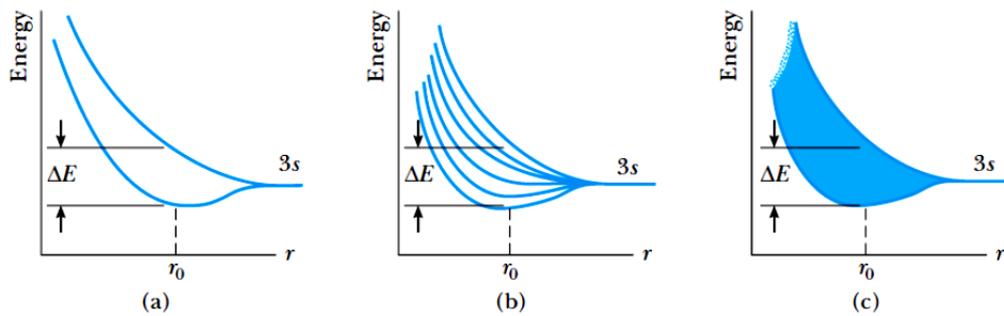
Estas abordagens são equivalentes e resolve muito bem o problema da formação de bandas num sólido. Neste trabalho, consideramos apenas o tratamento das ondas deslocalizadas dos elétrons num potencial periódico.

### **2.2.1 Aproximando átomos – Desdobramento dos níveis de Energia**

Neste tipo de abordagem, o problema da formação de bandas de energia num sólido se baseia na aproximação de dois ou mais átomos de sódio (com mais camadas eletrônicas).

Quando isolados, cada átomo de sódio apresentava seus níveis degenerados devido à falta de interação. Supondo-se que cada átomo isolado possui um elétron no nível mais externo (3s) e, portanto, com certa energia específica. A medida que dois destes átomos se aproximam mutuamente, suas funções de onda são sobrepostas e os níveis degenerados são então separados em níveis distintos. (Serway et al ,2005)

A Figura 2 representa de maneira simples o que ocorre com a camada 3s à medida que mais átomos são ligados para formar o sólido:



**Figura 2.** Separação de níveis 3s para dois átomos de sódio próximos (a). Desdobramento dos níveis para seis átomos de sódio próximos (b) e (c) formação da banda 3s quando um número grande de átomos de sódio se aproxima para formação do sólido. (SERWAY et al, 2005. p. 426)

O desdobramento em mais níveis energéticos pode ser entendido a partir da combinação das funções de onda de cada estado dos átomos isolados. A compreensão deste problema torna-se mais simples se retomarmos ao enlace molecular dos átomos de hidrogênio.

Diante da complexidade em escrever a função de onda de cada elétron que considere o campo de vários núcleos e o efeito dos outros elétrons, há necessidade em descrever matematicamente o problema a partir da adição de um dos elétrons ao íon  $H_2^+$ . Com a adoção deste modelo, o problema torna-se mais simples, pelo menos, matematicamente, e é equivalente ao tratamento para cada átomo de hidrogênio quando são aproximados para formação da molécula  $H_2$ .

O íon  $H_2^+$  consiste de um elétron num campo de dois prótons. O elétron é atraído por cada próton pela força coulombiana de atração, resultando em um potencial de energia:

$$U(\mathbf{r}) = -\frac{ke^2}{|r|} - \frac{ke^2}{|r-R|} \quad [24]$$

A Equação 24 assume que um dos prótons está situado na origem do sistema de coordenadas em  $\mathbf{r}=0$  e o outro em  $\mathbf{R}$ . As funções de onda do estado estacionário e as energias para o elétron são soluções da equação de Schrödinger considerando o potencial escrito acima.

Quando os dois átomos estão isolados, o estado base dos átomos separados é duplamente degenerado. Isto se deve à presença do outro próton do sistema. Assim, “todos os níveis atômicos no limite do átomo isolado possuem uma degeneração

adicional dupla, correspondente as funções de onda semelhantes às do átomo de hidrogênio centradas na posição de qualquer próton” (SERWAY et al, 2005. p.391).

Com a aproximação dos átomos, os elétrons não podem mais “estar” indefinidamente com seu próton original. Cada um pode, então, ocupar o orbital atômico do átomo mais distante, por um determinado tempo. A simetria do problema indica que cada elétron passa quantidades iguais de tempo na vizinhança de cada próton. Portanto, considera-se a “mistura” igualitária das funções de onda centradas em cada próton.

$$\psi_+(\mathbf{r}) = \psi_a(\mathbf{r}) + \psi_a(\mathbf{r} - \mathbf{R}) \quad [25]$$

Em outras palavras, e como revela a equação acima, há uma combinação linear simétrica das funções de onda atômicas centradas nas posições dos prótons, em que assumimos  $\mathbf{r}=0$  e  $\mathbf{r}=\mathbf{R}$ . O índice “a” é necessário para identificar um determinado estado atômico<sup>4</sup>. A Figura 3 representa a combinação linear das funções de onda do sistema:



**Figura 3.** Função de onda resultante da combinação simétrica dos orbitais atômicos centrados em  $\mathbf{r}=0$  e  $\mathbf{r}=\mathbf{R}$ . (SERWAY et al, 2005. p.393)

Os elétrons neste estado passam a maior parte do seu tempo, no espaço entre os dois prótons. Ou seja, o elétron tem alta probabilidade de ser encontrado na metade do caminho entre os íons. A função  $\psi_+$  é geralmente conhecida como orbital ligante. Este age como uma espécie de "cola" que favorece à formação molecular.

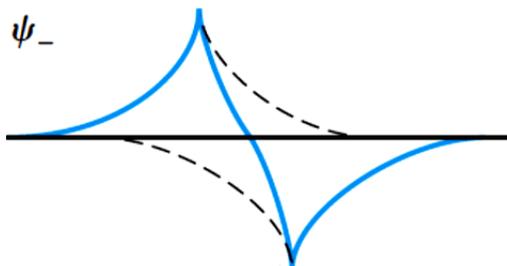
Outra possível combinação das funções de onda dos orbitais atômicos é a combinação antissimétrica. Esta combinação descreve o elétron num estado mais confinado e, portanto, possui maior nível de energia se comparado com a combinação simétrica. A combinação assimétrica pode ser escrita da seguinte forma:

$$\psi_-(\mathbf{r}) = \psi_a(\mathbf{r}) - \psi_a(\mathbf{r} - \mathbf{R}) \quad [26]$$

---

<sup>4</sup> Para o problema, considera-se  $a=(1,0,0)$  para representar o estado base do átomo de hidrogênio. Isto é equivalente a identificação dos números quânticos  $n=1$ ,  $l=0$  e  $m_l=0$ .

O orbital antissimétrico  $\psi_-$  (representado na Figura 4) não contribui para a formação molecular devido ao confinamento dos elétrons. A densidade de probabilidade desaparece no ponto médio dos íons.

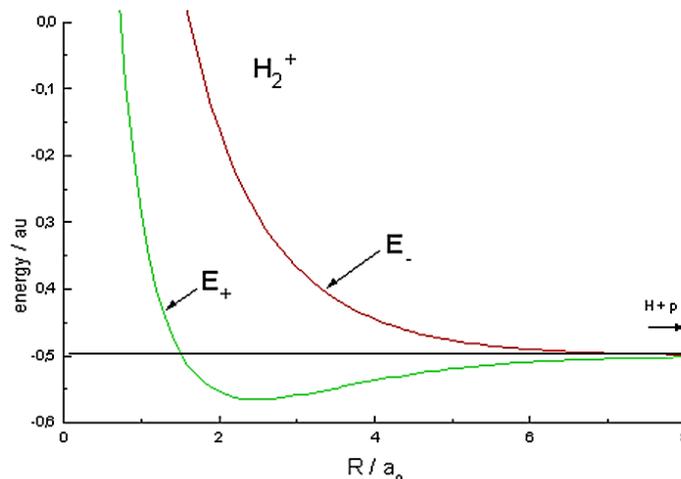


**Figura 4.** Função de onda resultante da combinação antissimétrica destes mesmos orbitais atômicos. (SERWAY et al, 2005. p.393)

O cálculo da energia dos orbitais ligante e antiligante pode ser feito com a substituição das funções  $\psi_+$  e  $\psi_-$  na Equação de Schrödinger, considerando o potencial  $U(\mathbf{r})$  como descrito anteriormente.

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + U(\mathbf{r})\psi = E\psi \quad [27]$$

As soluções  $E_+$  e  $E_-$  são as soluções aproximadas para a energia total dos orbitais ligante e não-ligante (ou antissimétrico) para o íon  $H_2^+$ . O desenvolvimento matemático para determinar estas soluções não será explorado neste trabalho. O objetivo deste tratamento é de destacar os níveis de energia ligante e antiligante do sistema formado por dois átomos de hidrogênio para que se possa extrapolar para o problema de muitos átomos próximos, como é o caso do problema da aproximação dos átomos de sódio, tratado anteriormente. As soluções encontradas para  $E_+$  e  $E_-$  são mostradas no seguinte gráfico:



**Figura 5.** As curvas acima representam a energia total para orbitais ligantes (+) e não-ligante (-). Fonte: [http://www.pci.tu-bs.de/aggericke/PC4e/Kap\\_II/H2-Ion.htm](http://www.pci.tu-bs.de/aggericke/PC4e/Kap_II/H2-Ion.htm)

Com a aproximação de um número ( $N$ ) muito grande de átomos (de sódio, por exemplo), vários níveis se subdividem devido às inúmeras combinações lineares possíveis dos vários átomos que formarão o sólido. A Figura 2b representa o desdobramento dos níveis de energia em 6 níveis discretizados. Neste caso, tem-se a aproximação de seis átomos de sódio.

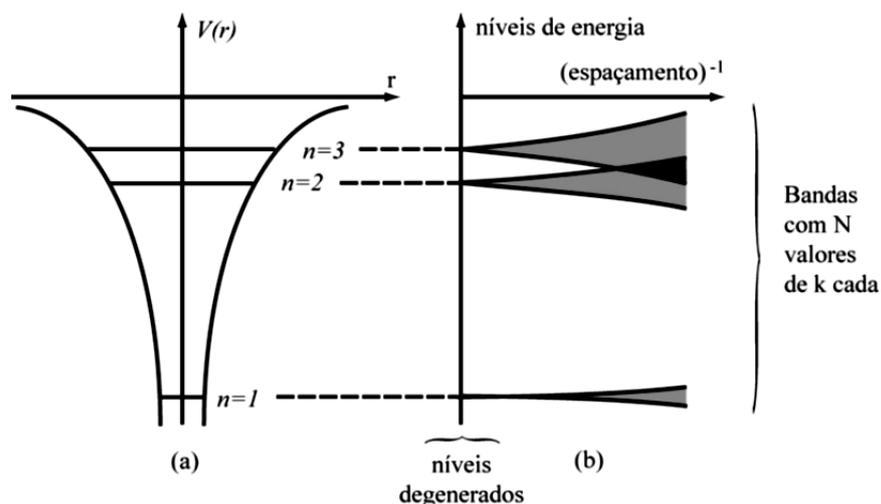
No entanto, para um número  $N \approx 10^{23}$  átomos/cm<sup>3</sup>, muitos níveis são desdobrados dispondo-se numa aparente faixa contínua de níveis de energia. Estes níveis próximos formam uma contínua banda de energia como pode ser evidenciado na Figura 2c, para  $N$  átomos de sódio.

Um sólido cristalino tem, geralmente, numerosas bandas permitidas – uma de cada nível atômico. Além disso, sempre surgirão regiões proibidas que separam as bandas permitidas, a menos que os níveis se alarguem tanto que eles sobrepõem. A capacidade de elétrons em cada banda para um sistema de  $N$  átomos, é de  $2(2l+1)N$  (SERWAY et al, 2005).

As bandas de energia são, portanto, formadas pela combinação das funções de onda de cada nível atômico. Segundo Laureto (2005), estas bandas

têm origem na sobreposição dos níveis de energia dos átomos, quando estes se agrupam para formar o sólido. Essas bandas têm uma estrutura que está intimamente relacionada com o arranjo cristalino e podem ser consideradas como um mapeamento dos níveis de energia permitidos aos elétrons de valência do sólido. (LAURETO et al, 2005. p. 25)

A sobreposição das funções de onda na formação do sólido propicia a quebra da degenerescência dos níveis de energia (antes atômicos) formando bandas proporcionais a estas sobreposições atômicas. A Figura 6 indica a formação de bandas com o alargamento dos níveis sobrepostos:



**Figura 6.** Representação esquemática de níveis atômicos não degenerados (a) e (b) Os níveis de energia para N átomos em um potencial periódico, em função do inverso do espaçamento atômico médio. (GUIMARÃES & MUNIZ, 2008)

A Figura 6 mostra que os níveis, antes degenerados, passam a formar bandas de energia devido à sobreposição das funções de onda dos N átomos que formam o sólido.

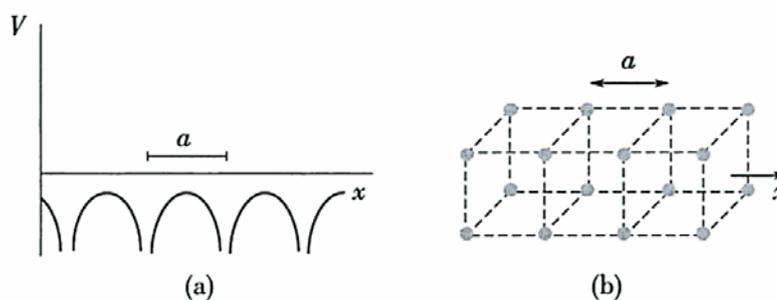
### 2.2.1.1 Partícula num potencial periódico – o Modelo de Kronig-Penney

Outro tratamento possível para compreender o sólido e a formação dessas bandas de energia consiste em estudar as funções de onda dos elétrons de uma rede periódica de átomos. Neste modelo de sólido, o elétron experimenta um potencial eletrostático constante por todo seu volume e, diante da simetria existente, as regiões interatômicas podem ser caracterizadas como barreiras de potencial que previnem que os elétrons deixem o sólido. (ROMANO, 2003).

No entanto, escrever a equação de Schrödinger para um elétron no interior da estrutura complexa da rede é um tanto quanto difícil. Segundo Yu & Cardona (2010), a descrição matemática do Hamiltoniano, necessário na Equação de Schrödinger,

deve considerar não somente a energia cinética dos elétrons, como também todo potencial que o elétron em estudo terá influência.

Uma aproximação bastante recorrente e citada por Rezende (2004), consiste em considerar que o problema envolve apenas um elétron (modelo de um elétron), e que todos os outros são considerados parte integrante dos íons que criam um potencial periódico, como ilustrado na Figura 7. Este potencial ao qual o elétron está submetido leva às soluções da equação de Schrödinger cujas energias formam bandas.



**Figura 7.** (a) Energia potencial  $V$  de um elétron ao longo do eixo  $x$  do cristal mostrado em (b). (REZENDE, 2004. p. 94)

Segundo Rezende (2004), a solução para um potencial periódico, como o da Figura 7a, mesmo sendo o mais simples, ainda é complexa. Uma destas complexidades se deve à forma matemática do potencial que “confina” os elétrons. Este não é constante no interior do poço e sua pequena variação periódica altera a propagação da onda de elétron.

Para obter a solução para equação de onda de Schrödinger, fazemos uso de um teorema matemático por Bloch. Este teorema leva em conta a simetria translacional do cristal de modo que as funções (chamadas de funções de Bloch) reflitam o efeito do potencial cristalino.

A solução geral da Equação de Schrödinger com um potencial periódico  $V(x)$  é dada por  $\psi(x) = u(x)e^{ikx}$ . Esta é uma onda plana (parte exponencial), modulada por uma função  $u(x)$  que representa a influência no potencial periódico,  $V(x)$ , sobre o movimento de elétrons. A função de modulação  $u(x)$  distingue o movimento eletrônico num sólido de vácuo, sólido cristalino (e não cristalino), e em diferentes materiais, como moléculas, sólidos, líquidos e gases. (SAH, 1991)

Pode-se mostrar que o módulo  $u(x)$  é uma função periódica cuja periodicidade reflete a rede cristalina. A principal consequência do Teorema de Bloch é que  $u(x)$

pode ser reescrito como:  $u(x) = u(x+a) = u(x+na)$ , sendo  $n$  um número inteiro e  $a$  a periodicidade da rede. Como  $u(x)$  é periódico, esta função pode ser expandida numa série de Fourier da forma:

$$u(x) = \sum_n C_n e^{iK_n x} \quad [28]$$

,  $C_n$  são os coeficientes da expansão e  $K_n = 2\pi n/a$  (vetor no espaço recíproco associado à simetria translacional da rede).

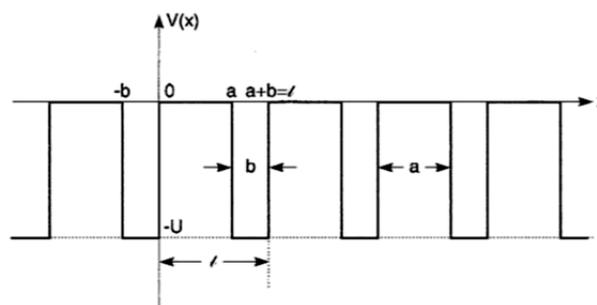
Ao substituir o resultado desta expansão na equação  $\psi(x) = u(x)e^{ikx}$ , tem-se:

$$\psi(x) = \sum_n C_n e^{i(K_n+k)x} \quad [29]$$

Estas duas substituições convertem a equação diferencial de Schrödinger num conjunto de equações algébricas simultâneas de coeficientes desconhecidos  $C_n$ , e de fácil resolução.

Considerando o Teorema de Bloch para a rede cristalina e a aproximação do potencial, Mcquarrie (1996) sugere o tratamento do problema a partir do modelo de Kronig-Penney.

Em física do estado sólido, este modelo, formulado inicialmente em 1930 pelos físicos Ralph Kronig e William George Penney, descreve os estados de energia de um elétron pertencente a um cristal cujo potencial é periódico e unidimensional, como mostra a figura:

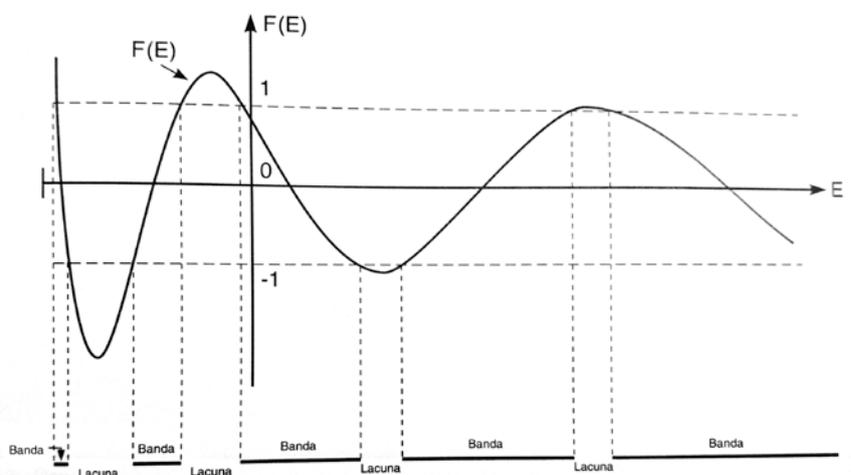


**Figura 8.** Rede periódica unidimensional infinita (grande número de átomos) (NUSSSENSWEIG, 1996, p. 396)

Neste modelo bastante simplificado, o potencial  $V(x)$  (da figura anterior) associado à rede, que é sentido por um elétron, é uma série de poços retangulares atrativos, de profundidade  $U$  e largura  $b$ , com período espacial.  $V(x)$  representa o efeito de todas as partículas sólido cristalino, exceto o elétron considerado (NUSSSENSWEIG, 1996). Este é um problema relativamente simples da Mecânica Quântica, no entanto, devido à quantidade de etapas de cálculo necessária para

solucionar a Equação de Schrödinger, preferimos apenas apontar seu principal resultado: a formação de bandas permitidas e proibidas.

Para determinados valores de  $E$  (energia total do sistema), o espectro de energia associado a um cristal unidimensional é um espectro de bandas, separadas por regiões proibidas onde não há níveis de energia. Isto é, para energias  $E < 0$ , as bandas são estreitas e corresponderiam a estados ligados discretos nos polos individuais. Os elétrons estariam mais fortemente ligados à rede e menos afetados pela presença de outros átomos. Para energias  $E > 0$ , acima dos topos dos poços de potencial, as lacunas ficariam cada vez mais estreitas, com o crescimento de  $E$ .



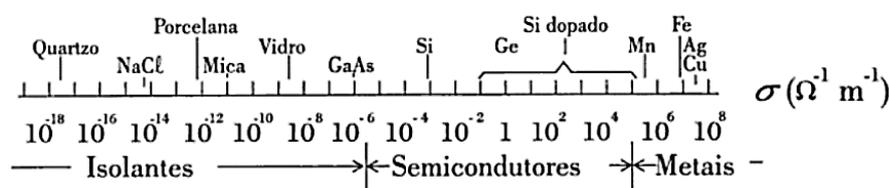
**Figura 9.** Bandas de energia permitidas e proibidas. (NUSSENSWEIG, 1996. p. 401)

Como mostra a Figura 9, a intersecção das curvas  $F(E)$  com as retas  $F(E) = \pm 1$  indicam a distribuição de energias permitidas e proibidas para os elétrons do sólido cristalino. Este gráfico é obtido considerando-se as possíveis soluções da função de Schrödinger para as funções de Bloch e um trabalhoso tratamento matemático omitido aqui neste trabalho. Segundo Nussensweig (1996), o problema revela um resultado fundamental: “o espectro de energia associado a um cristal unidimensional é um espectro de bandas, separadas por lacunas "proibidas", onde não há níveis de energia.”

Devido à simplicidade em tratar o problema da formação do sólido e surgimento das bandas de energia, o modelo de Kronig-Penney foi utilizado durante a aplicação da sequência didática em sala de aula através de uma simulação computacional que será mostrada no Capítulo 4.

## 2.3 Sólidos semicondutores e processo de dopagem

De uma maneira geral, semicondutores são sólidos, geralmente cristalinos, de condutividade elétrica intermediária entre condutores e isolantes. Segundo Colinge & Colinge (2005) A condutividade de um material depende diretamente do número de portadores livres, como os elétrons. Quanto maior o número destes portadores, maior será a condutividade.



**Figura 10.** Condutividade em  $\Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$  de uma variedade de materiais à temperatura ambiente. (REZENDE, 2004, p. 114)

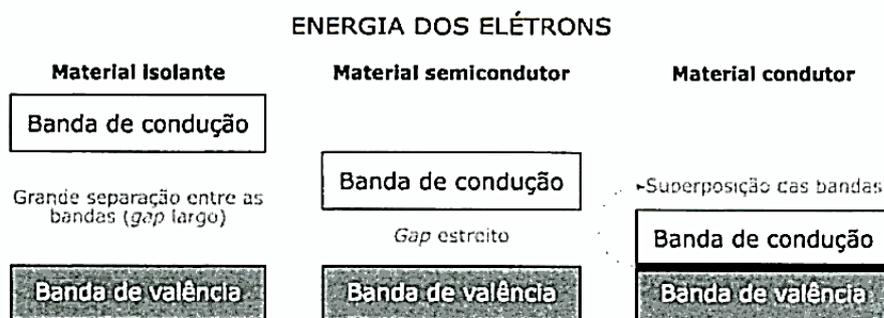
Neste sentido, como mostra a figura, conceitua-se como condutor um material onde a concentração de elétrons é da ordem de  $10^{23}$  elétrons/ $\text{cm}^3$ , de modo que sua condutividade varia de  $10^6$  a  $10^8$  ( $\Omega \cdot \text{m}$ ) $^{-1}$ . Enquanto isso, um material isolante possui de  $10^6$  a  $10^7$  elétrons livres por  $\text{cm}^3$ , com ordem de grandeza da condutividade variando entre  $10^{-10}$  e  $10^{-20}$  ( $\Omega \cdot \text{m}$ ) $^{-1}$ . Finalmente, materiais semicondutores apresentam valores intermediários: à temperatura ambiente, atingem concentrações entre  $10^{12}$  e  $10^{13}$  elétrons/ $\text{cm}^3$ , com condutividades entre  $10^{-6}$  e  $10^4$  ( $\Omega \cdot \text{m}$ ) $^{-1}$ .

A compreensão das propriedades físicas dos materiais semicondutores (e dos sólidos em geral) só foi possível com as descobertas da Física Quântica. A Teoria de Bandas, por exemplo, é uma das teorias da FMC mais aceitas pela comunidade científica que consegue caracterizar muito bem o sólido.

Como vimos, em uma das abordagens da seção anterior, o agrupamento atômico cria níveis de energias possíveis para os elétrons que se agrupam em bandas permitidas separadas por bandas proibidas (Energia de Gap) devido à periodicidade do potencial criado por íons em sólidos. Com o desenvolvimento da Teoria de Bandas foi possível diferenciar os sólidos quanto à condução de eletricidade e, portanto, classifica-los em condutores, semicondutores e isolantes.

Sabemos que a energia dos elétrons nos sólidos pode ter valores compreendidos nas bandas de energia permitidas. Ao preencher os níveis permitidos, os elétrons tendem a ocupar sempre os estados com menor energia. A última banda de energia ocupada por elétrons é chamada de banda de valência e banda de energia permitida diretamente acima da banda de valência é denominada banda de condução. Num semiconductor (puro), a  $T=0K$ , as bandas permitidas mais baixas estarão sempre cheias, isto é, saturadas. Os elétrons das bandas saturadas não podem participar da condução já que necessitam de energia extra suficiente para saltar a Banda de Gap. É a “largura” desta banda de energia proibida que vai definir as características de condução num sólido.

A banda de gap é muito mais larga nos isolantes (se comparada com o semiconductor) o que impede a transferência de elétrons da banda de valência para a banda de condução, ficando essa banda vazia. Por não haver elétrons na banda de condução, os materiais isolantes são maus condutores de corrente elétrica (VALADARES, CHAVES & ALVES, 2005). A Figura 11 mostra a separação energética entre as bandas de valência e condução que caracteriza os materiais isolantes, semiconductor e condutor, respectivamente.

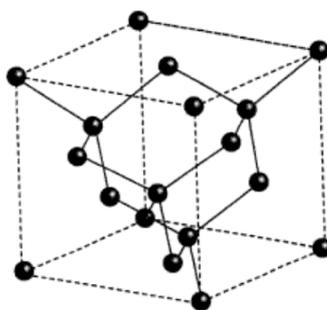


**Figura 11.** Estrutura de banda de isolantes, semicondutores e metais (VALADARES, CHAVES & ALVES, 2005, p. 9)

Quando os elétrons enchem parcialmente uma das bandas permitidas, os elétrons podem se deslocar com mais facilidade com ação de campos elétricos. O cristal, assim, pode ser um condutor, um semiconductor ou um semimetal. Num condutor, as bandas permitidas parcialmente cheias possuem um grande número de elétrons.

Para Colinge & Colinge (2005), a distinção entre um isolante e um semicondutor é puramente quantitativa e é baseada no valor da energia de gap. Num semicondutor,  $E_g$  é menor que 3eV e até mesmo energia térmica ou excitação da luz visível pode dar aos elétrons energia suficiente para "saltar" da banda de valência para a condução.

O silício e o germânio são os semicondutores mais importantes para a eletrônica. A estrutura cristalina do silício assemelha-se com a rede cristalina do diamante no que se refere à distribuição dos seus átomos. Ligações tetraédricas entre átomos, resultado da ligação covalente são tridimensionais e muito mais complexas que as ligações de um cristal unidimensional.



**Figura 12.** Célula unitária da estrutura cristalina do diamante, na qual também cristalizam os semicondutores Si e Ge (REZENDE, 2004, p.13)

O movimento de elétrons em semicondutores puros é pequeno e desprezível se comparado com o movimento em metais. Praticamente nenhum dispositivo na eletrônica usufrui desta corrente elétrica denominada corrente intrínseca. No entanto, a condutividade pode ser drasticamente alterada com a presença de impurezas. O termo impureza referida está relacionada com a inserção de átomos diferentes no cristal semicondutor puro.

O processo de colocar impurezas de elementos conhecidos num semicondutor é denominado dopagem e os semicondutores dopados são chamados de extrínsecos. Muitos dispositivos eletrônicos encontrados atualmente são fabricados por uma variedade de tipos de dopagem.

A concentração dos portadores de carga (elétrons e buracos<sup>5</sup>) num semicondutor muitas vezes é alterada com a inserção de outros átomos na estrutura cristalina do material puro através de vários procedimentos de dopagem que alteram

---

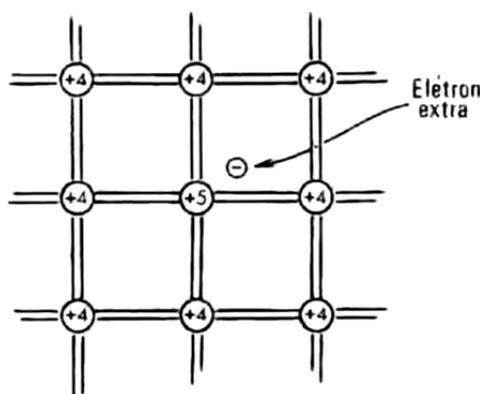
<sup>5</sup> A definição de lacunas (ou buracos) será feita ainda nesta seção.

consideravelmente as propriedades do sólido semiconductor puro. As impurezas mais usadas são certos elementos pentavalentes (arsênio, fósforo, antimônio) e trivalentes (boro, alumínio, gálio, índio).

Tomemos como exemplo um modelo de uma estrutura unidimensional cristalina pura formada por átomos de Si. Como se sabe, os quatro elétrons de valência são compartilhados com os átomos vizinhos em ligações covalentes que garantem a estabilidade do sólido.

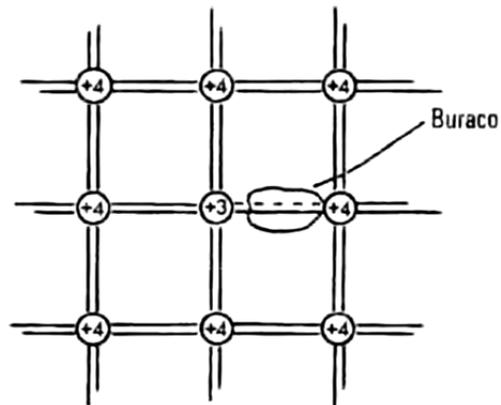
Se uma pequena quantidade de impureza pentavalente (por exemplo, o arsênio) for acrescentada ao semiconductor puro, apenas quatro dos cinco elétrons da última camada (valência) deste átomo serão compartilhados com os átomos de Si da vizinhança. Ou seja, apenas quatro átomos de valência do arsênio ficam retidos nas ligações covalentes e o elétron que “sobra” fica praticamente livre para vagar pelo cristal.

Como os átomos das impurezas pentavalentes cedem elétrons ao cristal, essas impurezas são chamadas de impurezas doadoras ou impurezas tipo N (de negativo).



**Figura 13.** Impurezas de átomos doadores no cristal de Si.(MELLO & BIASI, 1975)

Quando são acrescentadas ao silício uma impureza trivalente (o índio, por exemplo), ocorre exatamente o oposto, isto é, apenas três elétrons de valência dos átomos de índio poderão estabelecer as ligações covalentes com os átomos vizinhos de silício e uma das ligações ficará incompleta, “faltando” um elétron. A falta deste elétron é equivalente a inserção de um “buraco” na estrutura cristalina, isto é, os átomos das impurezas trivalentes “cedem buracos” ao cristal. Essas impurezas são chamadas de impurezas aceitadoras, ou impurezas tipo P (de positivo).



**Figura 14.** Impurezas de átomos aceitadores no cristal de Si. (MELLO & BIASI, 1975)

Nos semicondutores tipo N, que contêm impurezas doadoras, a concentração de elétrons é maior e estas partículas são conhecidas como portadores majoritários enquanto os buracos são os portadores minoritários. Nos materiais tipo P, os papéis se invertem.

Buracos ou lacunas em semicondutores são partículas fictícias semelhantes aos elétrons, exceto pelo sinal da carga elétrica que é positiva. Esta é uma descrição alternativa que favorece à compreensão das características dos semicondutores e do movimento de portadores de cargas nos dispositivos. Considerando estas partículas, já que estas estão associadas aos níveis disponíveis no extremo da banda de valência pode simplificar a abordagem dos problemas.

Num semicondutor intrínseco puro, sempre que um elétron é despreendido da ligação covalente, uma lacuna (ou buraco) é naturalmente deixada na estrutura. Isto é possível, por exemplo, com o aumento da temperatura do material. Podemos afirmar, portanto, que o número de elétrons é igual ao número de buracos para este tipo de semicondutor.

Para Rezende (2004), é o controle das propriedades dos semicondutores através da dopagem que possibilita utilizar estes materiais para fabricar uma grande variedade de dispositivos eletrônicos como os dispositivos optoeletrônicos<sup>6</sup>. É o caso do arseneto de gálio (GaAs) que possui propriedades ópticas diferenciadas e influenciadas pela forma das bandas. Neste material, transições eletrônicas diretas entre bandas de energia (gap direto) são acompanhadas pela emissão ou absorção

<sup>6</sup> São dispositivos tecnológicos que combinam a eletrônica com fenômenos ópticos.

de fótons no cristal, sem que outras partículas sejam envolvidas no processo de conservação de momento.

No semicondutor de gap indireto, como o Si e o Ge, partículas conhecidas como fônons<sup>7</sup> são geralmente emitidas ou absorvidas reduzindo a probabilidade de emissão ou absorção de fótons. É por este motivo que semicondutores de gap direto, como o GaAs citado, destacam-se na fabricação de lasers e diodos emissores de luz (LEDs).

### **2.3.1 O LED e a Fococélula**

O LED (Light Emitting Diode) é basicamente formado por uma junção de dois materiais semicondutores fortemente dopados e seu funcionamento deve-se, necessariamente, ao processo conhecido como recombinação. Este processo ocorre quando é aplicado uma tensão nos terminais que favorece a polarização direta na junção, local em que elétrons se recombinam com lacunas emitindo luz (fenômeno da eletroluminescência). Esta e outras propriedades na junção de semicondutores dopados serão melhor discutidas na próxima seção.

Os LEDs são frequentemente usados em dispositivos portáteis como aparelhos de som e vídeo, celulares, relógios e também muito usados em equipamentos científicos e industriais.

Diferentes tipos de LEDs são encontrados para variadas aplicações da eletrônica. LEDs infravermelhos são usados em sistemas de comunicações ópticas, baseados na transmissão de informação por meio de um feixe de luz infravermelho. Muito mais comum e largamente conhecidos são os LEDs utilizados para fazer lâmpadas indicadoras para painéis de equipamentos eletroeletrônicos. Estas lâmpadas podem ser constituídas por diferentes tipos de materiais semicondutores dopados ou então encapsuladas em diferentes plásticos coloridos para gerar distintas cores (verde, vermelho, alaranjado, etc.).

Atualmente os LEDs vem aos poucos substituindo as lâmpadas fluorescentes garantindo assim maior economia, durabilidade e eficiência. Estes modernos

---

<sup>7</sup> Fônons, em física da matéria condensada, são partículas associadas à energia vibracional que surge a partir de oscilação átomos dentro de um cristal.

dispositivos operam com base em processos quânticos de emissão de radiação conhecidos como processos de luminescência.

Rezende (2004) destaca que a forma mais tradicional e relativamente simples de se gerar luz, e muito difundida durante o século XX, era a partir do aquecimento de um material com elevado ponto de fusão e colocado no vácuo ou numa atmosfera inerte para evitar combustão do material. Para gerar luz no espectro do visível a partir das chamadas lâmpadas incandescentes, há um “desperdício” elevado de energia elétrica pois grande parte desta energia é convertida em calor ou radiação infravermelha. O autor aponta que apenas 13% da energia elétrica são convertidos em energia luminosa.

Uma célula solar ou fotocélula é o componente básico dos painéis fotovoltaicos. Este dispositivo é um tipo de fotodiodo com grande área de exposição à radiação, cuja operação se dá em condições de fornecer energia a uma carga externa (REZENDE, 2004). Fotodiodo é, basicamente, um tipo de detector de radiação no qual a eletricidade é produzida por geração de pares elétrons-buracos causada pela absorção de fótons (partículas da luz) no material semiconductor.

O maior interesse para a construção de dispositivos fotovoltaicos se deu a partir de 1970, com a crise no fornecimento de energia no ocidente. No ano de 1990, a crescente conscientização da necessidade de garantir novas fontes de energia alternativas aos combustíveis fósseis, incentivou a expansão da tecnologia fotovoltaica favorecendo a redução de custos.

O funcionamento destes dispositivos se baseia no Efeito Fotovoltaico (EF), inicialmente reportado em 1893 pelo físico experimental francês Edmund Becquerel. Ele observou a produção de corrente elétrica, a partir da luz, sobre um eletrodo de platina revestida de prata imerso num eletrólito. Cerca de 40 anos após, William Adams e Richard Day perceberam que uma fotocorrente produzida numa amostra de selênio ligada a dois contatos de platina aquecidos. Como nenhuma fonte externa alimentava o circuito, pôde-se concluir que a corrente produzida era proveniente da ação luminosa.

Em 1894, Charles Fritts construiu primeiras células solares construídas a partir de camadas (“wafers”) de selênio entre ouro e outra de metal. A compreensão de que a junção assimétrica dos diferentes materiais em contato contribuía para a ocorrência do EF foi de suma importância para o desenvolvimento de novas

estruturas. Goldman e Brodsky haviam percebido em 1914 a existência de uma barreira ao fluxo de corrente (o que é conhecido como retificação de corrente) em uma das interfaces de semicondutor-metal. Esta descoberta foi imprescindível para o desenvolvimento dos diodos a partir de 1930 pelos estudos de Walter Schottky, Neville Mott dentre outros.

A atenção dos pesquisadores era para a fotocondutividade e não necessariamente para o efeito fotovoltaico (NELSON, 2003). O que se sabia era que a corrente produzida era proporcional à intensidade da luz incidente e estava relacionada também com o comprimento de onda desta radiação.

The photovoltaic effect in barrier structures was an added benefit, meaning that the light meter could operate without a power supply. It was not until the 1950s, with the development of good quality silicon wafers for applications in the new solid state electronics, that potentially useful quantities of power were produced by photovoltaic devices in crystalline silicon. (NELSON, 2003, p. 3)

Com o desenvolvimento destes dispositivos construídos por pastilhas (ou “wafers”) de silício – material semicondutor – houve melhor aproveitamento das propriedades retificadoras dessas estruturas e da energia luminosa para condução de corrente, principalmente com a descoberta da junção PN, constituída de materiais semicondutores dopados.

Rezende (2004) destaca que as melhores células solares comercialmente usadas nos dias atuais são feitas de Si cristalino em forma circular, com diâmetro da ordem de 10cm – com o formato das lâminas obtidas durante o corte do material. Quando o Si amorfo ou policristalino é confeccionado em formato retangular, um grande painel pode ser montado a partir das células montadas uma ao lado da outra. Estes últimos materiais constituídos por Si são mais baratos do que o monocristalino no entanto os painéis fotovoltaicos formados por semicondutores III-IV, como GaAs e CdS, garantem maior eficiência na conversão de energia.

A luz do sol ao ser incidida numa célula fotovoltaica pode gerar uma tensão contínua de cerca de 1 Volt e uma fotocorrente próxima de 10 miliampères por cm<sup>2</sup>. A tensão e corrente geradas por uma única célula são insuficientes para a maioria das aplicações práticas. Torna-se necessário a associação destas células em série e em paralelo para construção de módulos com melhores performances elétricas. Esses módulos podem ser utilizados isoladamente ou ligados em paralelo e série de acordo com a potência exigida pela carga.

### 2.3.2 A Junção PN e o funcionamento dos dispositivos eletrônicos

Como vimos, semicondutores intrínsecos são pouquíssimos utilizados em dispositivos eletrônicos por conta da sua baixa condutividade e dependência direta da temperatura. No entanto, estas e outras propriedades são frequentemente alteradas no processo de dopagem. Além disso, os portadores de cargas podem se mover para determinadas direções somente quando dois diferentes semicondutores dopados são unidos. Esta, talvez, seja a característica mais notável da chamada “junção PN” – a capacidade de deixar passar corrente em apenas uma direção. Segundo Serway et al (2005)

In order to make devices, one must be able to fabricate semiconductors with well-defined regions of different conductivity. Both the type (positive or negative) and number of carriers in a semiconductor may be tailored to the needs of a particular device by the addition of specific impurities in a process called doping. (SERWAY et al 2005. p. 433)

Segundo Rezende (2004), os principais processos dinâmicos são a criação de pares elétron-buraco, a recombinação de pares e o movimento coletivo desses portadores. Estes processos serão aqui explicitados através de modelos clássicos, embora somente com a Física Quântica, pôde-se compreender como, de fato, estes processos ocorrem. O que interessa aqui é o movimento dos portadores de carga quando estas partículas estão desprendidas no semicondutor.

Vale destacar que, diferentemente do que ocorre em um metal, no qual podemos entender suas propriedades de transportes considerando apenas o que ocorre na banda de condução, em materiais semicondutores temos que necessariamente levar em conta as bandas de valência e condução, assim como o movimento de dois tipos de portadores de cargas: elétrons e buracos. O movimento destes portadores de carga elétrica garante a operação dos variados tipos de dispositivos semicondutores.

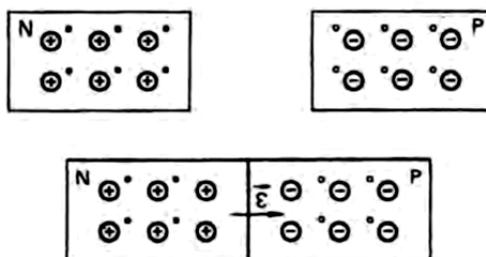
Como a maioria dos dispositivos optoeletrônicos são formados pela junção de dois ou mais materiais semicondutores dopados, geralmente por uma junção PN, a dinâmica dos elétrons e buracos será aqui estudada a partir do modelo unidimensional equivalente desta junção. Mas antes é necessário definir com certa simplicidade o que é uma junção PN e qual sua importância.

Simplificadamente, uma junção PN é formada quando um de tipo P e um semiconductor do tipo N estão em contato. Se a junção for feita com o mesmo material semiconductor (por exemplo, silício tipo N e silício tipo P), a junção é uma homojunção. Se os materiais semicondutores são diferentes a junção é uma heterojunção. Um diodo é um dispositivo semiconductor que consiste de uma única junção PN. Alguns diodos (constituídos por uma heterojunção) podem emitir luz (LEDs), e os outros podem emitir luz laser (diodos laser).

Segundo Mello & Biasi (1975), somente para efeito de discussão qualitativa, se uma junção PN fosse formada, simplesmente “justapondo” (aproximação de junção abrupta) um bloco de material tipo P em um bloco de material tipo N, mesmo na ausência de campo elétrico externo, haverá movimento de portadores de carga por um tempo extremamente limitado. O autor destaca que uma corrente de difusão surge por conta das diferentes concentrações de portadores de cada lado da junção. Esta corrente continuaria existindo até que as distribuições tornassem uniformes em todo o cristal.

Mas como os elétrons e buracos possuem cargas elétricas, a situação é bem diferente. À medida que os elétrons do lado N vão passando para o lado P e os buracos do lado P passam para o lado N (devido à corrente de difusão), um campo elétrico vai sendo estabelecido internamente dirigido do lado N para o lado P por íons imóveis e carregados, porém com cargas fixas e não neutralizadas (porque possuem carga elétrica diferente de zero). Isto se deve às impurezas doadoras no lado N e às impurezas aceitadoras no lado P.

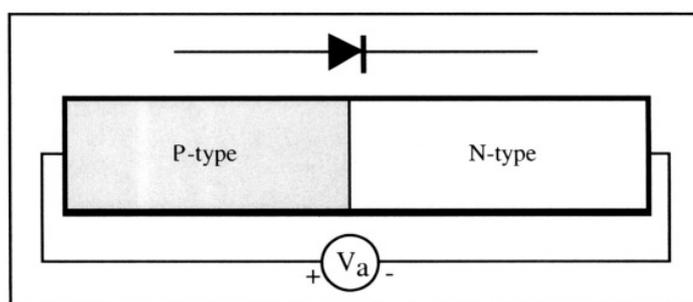
A região onde é estabelecido o campo elétrico é conhecida como região de carga espacial ou comumente chamada de região de depleção. Nesta região também podem ocorrer recombinações dos portadores de carga. Isto é, alguns elétrons que difundiram do material tipo N ocupam as lacunas mais próximas do material tipo P.



**Figura 15.** Junção PN e Campo Elétrico na região de depleção. (MELLO & BIASI, 1975)

O campo estabelecido na junção empurra os buracos de volta ao lado P e os elétrons de volta ao lado N, nas proximidades da junção, através de uma corrente de deriva que se opõe à corrente de difusão até que o equilíbrio seja estabelecido. Nesta situação de equilíbrio, a corrente total pela junção deve ser nula. Se existe um determinado campo elétrico na região de carga espacial, é fato que também existirá um determinado potencial elétrico, pois a todo campo elétrico está atrelado um potencial, conhecido como potencial de barreira ou potencial de contato.

A diferença de potencial de contato surge porque ocorre uma redistribuição de cargas entre as regiões N e P do semicondutor. Se é aplicada uma certa diferença de potencial externa nas extremidades da junção PN, estaremos criando um simples circuito com um diodo semicondutor.



**Figura 16.** Esquema de um diodo semicondutor em polarização direta. (COLINGE & COLINGE, 2005, p. 96)

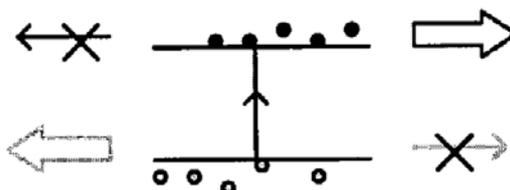
Dependendo da diferença de potencial aplicado à junção, o diodo semicondutor será polarizado diretamente, possibilitando a passagem de portadores de cargas pela região de depleção, ou polarizado inversamente, impossibilitando a passagem de elétrons e buracos. Segundo Colinge & Colinge (2005),

An analogy of the diode is a valve which controls liquid flow (Figure 4.3). When a pressure differential is applied in the forward direction, the valve opens and allows the liquid flow. If the pressure differential is applied in the reverse direction, the valve closes, and no liquid flows, except for a few drops if the valve is imperfect and somewhat "leaky". (COLINGE & COLINGE, 2005, p. 96)

Quando esta junção, constituída de certos materiais semicondutores, configurar um LED, o movimento dos portadores em polarização direta gera, no interior da zona de depleção, o processo de recombinação, com a emissão de fótons. A junção é útil, portanto, para orientar os portadores de carga para distintas direções com a aplicação da diferença de potencial.

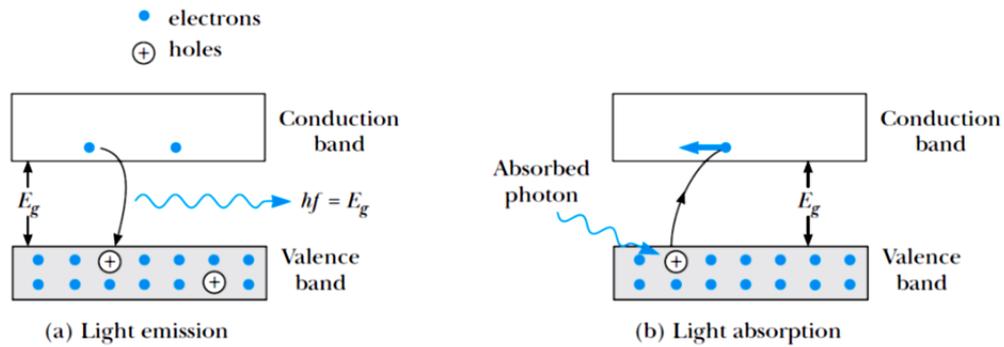
O processo de recombinação entre elétrons e lacunas é, na verdade, o salto de elétrons da banda de condução de um determinado material semiconductor para a banda de valência. Neste processo o elétron perde energia que é liberada sob a forma de um fóton, com energia bem definida. Segundo Cavalcante et al (1999), a queda de um elétron para preencher uma lacuna na banda de valência, com a emissão de um fóton, tem grande semelhança com a queda de elétrons nas transições entre os estados atômicos, como o modelo de Bohr indicava.

Basicamente o processo inverso ocorre na fotocélula. A conversão de energia nas células fotovoltaicas resulta da geração de carga, separação e transporte destas pelo semiconductor. Segundo Nelson (2003), em princípio, existem muitas maneiras de fornecer um processo de separação de cargas. Uma destas é junção entre dois materiais semicondutores diferentemente dopados, como a junção PN. Ela orienta os portadores de cargas na estrutura fornecendo um caminho de baixa resistência para os elétrons, mas bloqueando o fluxo de buracos, enquanto o outro fornece um caminho fácil para buracos, mas cria uma barreira para os elétrons, como mostra a figura:



**Figura 17.** Esquema do mecanismo de separação de cargas num dispositivo fotovoltaico. Assimetria para o movimento de elétrons e buracos (NELSON, 2003, p. 119)

Com a incidência de luz numa junção PN, por exemplo, ocorre a criação de pares elétron-buraco pois um elétron da banda de valência de um dos materiais semicondutores absorve um fóton e salta para a banda de condução (SERWAY et al, 2005). Elétrons e buracos gerados pela luz incidente são separados pelo campo da junção gerando movimento dos portadores de carga. A Figura 18 mostra a diferença fundamental entre os processos supracitados:



**Figura 18.** (a) Emissão de Luz de um semicondutor; (b) Absorção de Luz de um semicondutor (SERWAY et al, 2005, p. 437)

O Efeito Fotovoltaico (EF) deve-se, basicamente, aos saltos quânticos dos elétrons entre as bandas de energia permitidas para estas partículas quando o semicondutor recebe energia suficiente da luz numa determinada faixa de frequência. A energia dos pacotes de luz deve ser suficiente para excitar os elétrons que deixarão a banda de valência para a banda de condução.

O deslocamento dos portadores de cargas dá origem a uma diferença de potencial ao qual chamamos de Efeito Fotovoltaico. Se as duas extremidades do "pedaço" de silício forem conectadas por um fio, haverá uma circulação de elétrons. Esta é a base do funcionamento das células fotovoltaicas.

## 2.4 Pressupostos Pedagógicos

### 2.4.1 A Teoria de Aprendizagem de Ausubel

David Ausubel era professor Emérito da Universidade de Columbia, em Nova York. Médico psiquiatra de formação, dedicou parte da sua carreira acadêmica à psicologia educacional. Foi representante do cognitivismo e, como outros, acredita que no indivíduo deve existir uma estrutura na qual a organização e a integração das ideias se processam. E é neste processo, e através da linguagem (verbal), que ocorre a aprendizagem.

A Teoria de Aprendizagem de Ausubel focaliza, essencialmente, numa teoria cognicista, ou seja, refere-se à forma como está organizado o conteúdo total de ideias na mente de um certo indivíduo. Ausubel constantemente refere-se, em sua teoria, ao

processo de aprendizagem, tal como ocorre em sala de aula, do ensino estruturado pelo professor a partir do que o aluno já sabe, isto é, seu conhecimento prévio. Segundo ele, este é o fator (isolado) que mais influencia a aprendizagem. O professor, no entanto, deve ser capaz de identificar o que está presente na estrutura cognitiva do aluno, num primeiro momento, e posteriormente propiciar situações de interação visando possíveis modificações relevantes nos atributos da estrutura cognitiva pela influência da nova teoria (ou conceito) (MOREIRA, 2011a).

O escopo da teoria Ausubeliana engloba uma certa quantidade de termos que rotula e caracteriza a aprendizagem como significativa – ou simplesmente AS. A aprendizagem quando é atribuída componentes pessoais é sempre significativa ou torna-se significativa. Novos significados também vão se modificando em função do processo interacional de ensino. Para Moreira (2011a), a AS é o conceito central da teoria de Ausubel. É um processo por meio do qual uma nova informação relaciona-se com um aspecto relevante da estrutura de conhecimento do indivíduo.

Ausubel define o conceito de *subsunçor* para estabelecer uma “ponte” do que o aprendiz sabe e o que se deseja ensinar. Novas ideias e informações podem ser aprendidas e retidas a medida em que conceitos relevantes (e geralmente mais inclusivos) estejam adequadamente claros e disponíveis na estrutura cognitiva do indivíduo e sirvam, dessa forma, como ancoradouro a novas ideias e conceitos. Segundo Borges (2005)

Quando novas informações adquirem significado para o indivíduo através da interação com esses conceitos, sendo por ele assimilados e contribuindo para a sua diferenciação, elaboração e estabilidade, a aprendizagem é dita significativa (BORGES, 2005, p. 31).

O subsunçor é, portanto, uma estrutura de conhecimento específica. É uma ideia ou uma proposição já existente na estrutura cognitiva que pode servir como ancoradouro a uma nova informação que passará a ser significativa para o sujeito. Geralmente, o conceito subsunçor começa a se formar e se desenvolver no indivíduo desde cedo. Para Borges (2005), os subsunçores se formam de forma gradativa em cada indivíduo. Crianças, por exemplo, geralmente por descoberta, testam hipóteses e formam conceitos com atribuição de significados próprios.

O *processo de subsunção* ocorre, segundo Ausubel, quando uma informação adquire significado para o indivíduo através da ancoragem em subsunçores. Há, neste

processo, uma relação de subordinação do novo conhecimento em relação à estrutura pré-existente na estrutura cognitiva do aprendiz. Novos subsunçores, com capacidade de ancoragem para novas ideias, vão se desenvolvendo. O conhecimento prévio serve então como base para atribuição de significados à nova informação pois este também se modifica com o surgimento de novos subsunçores (MOREIRA, 2011a).

Nota-se que o processo da AS é dinâmico. A estrutura cognitiva vai sendo constantemente restruturada e o conhecimento assimilado é construído. O que deve ser observado, segundo Borges (2005) é que

a aprendizagem significativa tem como característica a interação entre aspectos específicos e relevantes da estrutura cognitiva e as novas informações, através da qual estas adquirem significados, sendo incorporadas à estrutura cognitiva de forma não-litera e não-arbitrária. (BORGES, 2005. p. 33)

A estrutura cognitiva tende a uma organização hierárquica de conhecimentos em relação ao nível de abstração, generalidade e inclusividade das ideias. Essa estrutura é continuamente diferenciada pela assimilação de novos conceitos, novas proposições e ideias.

Para acelerar o processo de ancoragem, Ausubel sugere a manipulação da estrutura cognitiva do aprendiz através do uso de *organizadores prévios (OP)*. São materiais introdutórios, usados geralmente quando o sujeito não dispõe de subsunçores que ancorem novas aprendizagens, e com objetivo de servir como ponte entre os conceitos que o indivíduo possui e o que ele precisa saber para aprender significativamente. O uso destes instrumentos é recomendado quando os subsunçores existentes na estrutura cognitiva do indivíduo não estão suficientemente claros e estáveis para exercer as funções de ancoragem do novo conhecimento. (MOREIRA, 2011a)

Estes materiais introdutórios são imprescindíveis no processo da *diferenciação progressiva*, idealizado por Ausubel, pois apresentam elevado grau de inclusividade, abstração e generalidade. A partir destes materiais, as ideias mais gerais são apresentadas para que somente depois sejam progressivamente diferenciadas em termos de detalhes e especificidades.

A diferenciação progressiva é vista como um princípio programático da matéria de ensino, segundo o qual as ideias, conceitos, proposições mais gerais e inclusivos do conteúdo devem ser apresentados no início da

instrução e, progressivamente, diferenciados em termos de detalhe especificidade. (MOREIRA, 2011a. p.169)

Na concepção de Ausubel, e apontada por Moreira (2011a), duas hipóteses justificam o processo de diferenciação progressiva em que o conteúdo mais inclusivo deve ser apresentado em primeira instância. A primeira hipótese é que é menos difícil para o aprendiz captar aspectos diferenciados de um todo (mais inclusivo), previamente aprendido, do que chegar ao todo a partir de suas partes. A segunda hipótese refere-se à hierarquização das ideias na mente do indivíduo. Os conteúdos de uma certa disciplina são organizados de tal forma que as ideias mais inclusivas e gerais estão no topo e, progressivamente, incorporam conceitos, proposições e fatos menos inclusivos e mais diferenciados.

A *reconciliação integrativa*, outro princípio recorrente na abordagem Ausubeliana, ocorre quando o sujeito passa a agregar de forma significativa, os diversos conceitos “dissecados” do conteúdo mais inclusivo, com o estabelecimento de relações entre as ideias já estabelecidas na estrutura cognitiva. Segundo Ausubel,

à medida que novas informações são adquiridas, elementos existentes na estrutura cognitiva podem se reorganizar e adquirir novos significados; esta reorganização na estrutura cognitiva é chamada de reconciliação integrativa (AUSUBEL, 1978 apud MOREIRA E OSTERMANN, 1999, p.55).

À medida em que a nova informação vai sendo apresentada a partir dos conceitos mais gerais, as estruturas conceituais vão se interconectando umas com as outras através do trabalho intelectual e consciente do indivíduo que busca visualizar estas estruturas de forma hierárquica. Nesse processo, o indivíduo é capaz de “transitar” por toda estrutura cognitiva integrando, significativamente, conceitos e proposições, assinalando semelhanças e diferenças relevantes entre as ideias e reconciliando inconsistências reais ou aparentes. O OP pode contribuir neste processo. Segundo Moreira (1982) o OP

[...] deve apresentar não só a possibilidade de diferenciação progressiva como também a reconciliação integradora, princípio que se leva em conta quando se explora explicitamente as relações entre ideias, proposições e conceitos, apontando similaridades e diferenças significantes e reconciliando inconsistências reais e aparentes. (MOREIRA, 1982. p. 42)

Resumidamente, e segundo Moreira (2011a), o ensino sob uma abordagem Ausubeliana, em termos de significados, implica em:

1) *identificar a estrutura de significados aceita no contexto da matéria de ensino;*

2) *identificar os subsunçores (significados) necessários para a aprendizagem significativa da matéria de ensino;*

3) *identificar os significados preexistentes na estrutura cognitiva do aprendiz;*

4) *organizar sequencialmente o conteúdo e selecionar materiais curriculares, usando as ideias de diferenciação progressiva e reconciliação integrativa como princípios programáticos;*

5) *ensinar usando organizadores prévios, para fazer pontes entre os significados que o aluno já tem e os que ele precisaria ter para aprender significativamente a matéria.*

Uma das condições para que ocorra a AS é que o material a ser aprendido seja relacionável com a estrutura cognitiva do aprendiz, de maneira não-arbitrária e não-literal. Um material bem estruturado e contendo conhecimentos relevantes e com significados lógicos é considerado como *potencialmente significativo*. Ausubel considera que o material é potencialmente significativo quando este se encontra dentro da capacidade humana de aprender.

Por mais que o material seja potencialmente significativo para o estudante, ele pode optar em simplesmente decorá-lo. Assim, o aprendiz deve manifestar disposição para relacionar de maneira substantiva e não arbitrária o novo material, potencialmente significativo, ou então, ao simplesmente memorizar as ideias de forma arbitrária e literal, o processo de aprendizagem será mecânico e, certamente, não significativo.

Para Ausubel, dependendo da natureza do material a ser aprendido, a aprendizagem pode ser subordinada, superordenada ou combinatória. A mais comum é a aprendizagem por subordinação. Como já discutido anteriormente, neste processo, um conceito ou uma proposição que sejam potencialmente significativos são assimilados por um subsunçor mais inclusivo existente na estrutura cognitiva do sujeito (MOREIRA, 2011a). O processo de aprendizagem superordenada se dá quando o aprendiz reorganiza as ideias de modo que o novo conhecimento a ser

aprendido passa a ser hierarquicamente superior a outros. Por fim, a aprendizagem combinatória é a aprendizagem de proposições (ou em menor escala de conceitos) que não possuem uma relação de subordinação ou superordenação com proposições mais específicas e sim, com conteúdo amplo, relevante de uma maneira geral (MOREIRA, 2011a).

## **2.4.2 Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS)**

Pautadas nas Teorias de Aprendizagem, (MOREIRA, 2011b) sugere a construção de Sequências Didáticas consideradas como Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS) estruturadas visando uma Aprendizagem Potencialmente Significativa. A proposta é de uma alternativa ao método tradicional e mecânico de ensino onde a ênfase reside na recepção de informações e cópia dos conhecimentos como se fossem informações a serem memorizadas pelos alunos.

Moreira (2011b) parte de alguns princípios relacionados com as Teorias de Aprendizagem, como a importância do conhecimento prévio dos estudantes acerca do assunto que será abordado, que é também defendido por Ausubel. Outros princípios apoiados por Ausubel, como a diferenciação progressiva, a reconciliação integradora e o processo avaliativo, também poderão ser considerados na elaboração de uma UEPS.

Um dos tipos de instrumentos educacionais enfatizados por Moreira (1992) e que pode ser usado no processo avaliativo é a construção de mapas conceituais. Essencialmente, os mapas conceituais dispõem os conceitos em um domínio específico de conhecimento, dispostos de tal forma que suas interações sejam evidenciadas. Para Moreira (1992)

mapas conceituais devem ser entendidos como diagramas bidimensionais que procuram mostrar relações hierárquicas entre conceitos de uma disciplina e que derivam sua existência da própria estrutura conceitual da disciplina. (MOREIRA, 1992, p. 2)

Este instrumento pode ser usado para avaliar a aprendizagem sem que, para isso, seja necessário a atribuição de uma nota ao mapa conceitual do aluno. Moreira (1992) refere-se às potencialidades deste instrumento. Segundo o autor, os mapas podem ser utilizados para obtenção de “informações sobre o tipo de estrutura que o

aluno vê para um dado conjunto de conceitos”. Isto é, os mapas conceituais evidenciam a apresentação de conceitos e as suas relações hierárquicas acerca de um certo conteúdo. Geralmente é recomendado a utilização de linhas que vão unir conceitos aos subconceitos com palavras ou termos de ligação para estabelecer relações entre os conceitos.

O uso de mapas conceituais como instrumentos de avaliação implica uma postura que, para muitos, difere da usual. Na avaliação através de mapas conceituais a principal ideia é a de avaliar o que o aluno sabe em termos conceituais, isto é, como ele estrutura, hierarquiza, diferencia, relaciona, discrimina, integra, conceitos de uma determinada unidade de estudo, tópico, disciplina, etc. (MOREIRA, 1992, p. 12)

O delineamento e construção de um mapa conceitual, leva em conta o que o aprendiz aprende significativamente. Os mapas conceituais têm o propósito de evidenciar as possíveis diferenças e similaridades entre ideias relacionadas e a construção mental e hierárquica dos conceitos trabalhados do conteúdo mais inclusivo.

Os mapas conceituais encontram-se no grupo de propostas de cunho construtivista, e, portanto, necessitam de certas habilidades dos alunos para sua elaboração. É um instrumento presente no “modelo” de UEPS sugerido pelo autor.

Apresentaremos a seguir, na íntegra, os passos que Moreira (2011b) acredita que a UEPS deve considerar:

- 1) definir o tópico específico a ser abordado, identificando seus aspectos declarativos e procedimentais tais como aceitos no contexto da matéria de ensino na qual se insere esse tópico;
- 2) criar/propor situação(ções) – discussão, questionário, mapa conceitual, mapa mental, situação-problema, etc. – que leve(m) o aluno a externalizar seu conhecimento prévio, aceito ou não-aceito no contexto da matéria de ensino, supostamente relevante para a aprendizagem significativa do tópico (objetivo) em pauta;

- 3) propor situações-problema, em nível bem introdutório, levando em conta o conhecimento prévio do aluno, que preparem o terreno para a introdução do conhecimento (declarativo ou procedimental) que se pretende ensinar; estas situações-problema podem envolver, desde já, o tópico em pauta, mas não para começar a ensiná-lo; tais situações-problema podem funcionar como organizador prévio; são as situações que dão sentido aos novos conhecimentos, mas, para isso, o aluno deve percebê-las como problemas e deve ser capaz de modelá-las mentalmente; modelos mentais são funcionais para o aprendiz e resultam da percepção e de conhecimentos prévios (invariantes operatórios); estas situações-problema iniciais podem ser propostas através de simulações computacionais, demonstrações, vídeos, problemas do cotidiano, representações veiculadas pela mídia, problemas clássicos da matéria de ensino, etc., mas sempre de modo acessível e problemático, i.e., não como exercício de aplicação rotineira de algum algoritmo;
- 4) uma vez trabalhadas as situações iniciais, apresentar o conhecimento a ser ensinado/aprendido, levando em conta a diferenciação progressiva, i.e., começando com aspectos mais gerais, inclusivos, dando uma visão inicial do todo, do que é mais importante na unidade de ensino, mas logo exemplificando, abordando aspectos específicos; a estratégia de ensino pode ser, por exemplo, uma breve exposição oral seguida de atividade colaborativa em pequenos grupos que, por sua vez, deve ser seguida de atividade de apresentação ou discussão em grande grupo;
- 5) em continuidade, retomar os aspectos mais gerais, estruturantes (i.e., aquilo que efetivamente se pretende ensinar), do conteúdo da unidade de ensino, em nova apresentação (que pode ser através de outra breve exposição oral, de um recurso computacional, de um texto, etc.), porém em nível mais alto de complexidade em relação à primeira apresentação; as situações-problema devem ser propostas em níveis crescentes de complexidade; dar novos exemplos, destacar semelhanças e diferenças relativamente às situações e exemplos já trabalhados, ou seja, promover a reconciliação integradora; após

esta segunda apresentação, propor alguma outra atividade colaborativa que leve os alunos a interagirem socialmente, negociando significados, tendo o professor como mediador; esta atividade pode ser a resolução de problemas, a construção de uma mapa conceitual ou um diagrama V, um experimento de laboratório, um pequeno projeto, etc., mas deve, necessariamente, envolver negociação de significados e mediação docente;

- 6) concluindo a unidade, dar seguimento ao processo de diferenciação progressiva retomando as características mais relevantes do conteúdo em questão, porém de uma perspectiva integradora, ou seja, buscando a reconciliação integrativa; isso deve ser feito através de nova apresentação dos significados que pode ser, outra vez, uma breve exposição oral, a leitura de um texto, o uso de um recurso computacional, um audiovisual, etc.; o importante não é a estratégia, em si, mas o modo de trabalhar o conteúdo da unidade; após esta terceira apresentação, novas situações-problema devem ser propostas e trabalhadas em níveis mais altos de complexidade em relação às situações anteriores; essas situações devem ser resolvidas em atividades colaborativas e depois apresentadas e/ou discutidas em grande grupo, sempre com a mediação do docente;
- 7) a avaliação da aprendizagem através da UEPS deve ser feita ao longo de sua implementação, registrando tudo que possa ser considerado evidência de aprendizagem significativa do conteúdo trabalhado; além disso, deve haver uma avaliação somativa individual após o sexto passo, na qual deverão ser propostas questões/situações que impliquem compreensão, que evidenciem captação de significados e, idealmente, alguma capacidade de transferência; tais questões/situações deverão ser previamente validadas por professores experientes na matéria de ensino; a avaliação do desempenho do aluno na UEPS deverá estar baseada, em pé de igualdade, tanto na avaliação formativa (situações, tarefas resolvidas colaborativamente, registros do professor) como na avaliação somativa;

- 8) a UEPS somente será considerada exitosa se a avaliação do desempenho dos alunos fornecer evidências de aprendizagem significativa (captação de significados, compreensão, capacidade de explicar, de aplicar o conhecimento para resolver situações-problema). A aprendizagem significativa é progressiva, o domínio de um campo conceitual é progressivo; por isso, a ênfase em evidências, não em comportamentos finais.

Segundo Moreira (2011b), alguns aspectos transversais também devem ser levados em conta ao se elaborar uma UEPS. O autor ressalta três aspectos:

- 1) em todos os passos, os materiais e as estratégias de ensino devem ser diversificados, o questionamento deve ser privilegiado em relação às respostas prontas e o diálogo e a crítica devem ser estimulados;
- 2) como tarefa de aprendizagem, em atividades desenvolvidas ao longo da UEPS, pode-se pedir aos alunos que proponham, eles mesmos, situações-problema relativas ao tópico em questão;
- 3) embora a UEPS deva privilegiar as atividades colaborativas, a mesma pode também prever momentos de atividades individuais.

### **3. METODOLOGIA DA PESQUISA**

Neste capítulo, descrevemos a abordagem da pesquisa, o contexto em que a pesquisa ocorreu, a caracterização dos participantes, as técnicas e os procedimentos metodológicos, e os instrumentos utilizados na coleta de dados.

#### **3.1 Abordagem da Pesquisa**

Segundo Gil (1999, p. 42), a pesquisa é um “processo formal e sistemático de desenvolvimento do método científico. O objetivo fundamental da pesquisa é descobrir respostas para problemas mediante o emprego de procedimentos científicos”.

A pesquisa geralmente parte de um problema, de uma questão que suscita a busca por respondê-la, e as hipóteses levantadas podem ser confirmadas ou invalidadas. Para isso, dois enfoques têm predominado na pesquisa em educação: quantitativo e qualitativo.

A pesquisa quantitativa busca estudar os fenômenos de interesse através de estudos experimentais ou correlacionais, caracterizados, primordialmente, por medições objetivas e análises quantitativas. Por outro lado, a pesquisa qualitativa tem interesse na “interpretação de significados atribuídos pelos sujeitos à suas ações em uma realidade socialmente construída, através de observação participativa, isto é, o pesquisador fica imerso no fenômeno de interesse” (MOREIRA, 2011c, p. 76).

Neste trabalho, a abordagem privilegiada foi qualitativa, pois acreditamos que a investigação da Aprendizagem Significativa (AS) não é independente do processo educacional. Isto é, estávamos interessados na análise dos significados atribuídos pelos sujeitos e relatados nos instrumentos de pesquisa durante a intervenção em sala de aula. No entanto, também usamos o enfoque quantitativo como forma de obtenção e análise dos dados.

#### **3.2 Instrumentos de Coleta de Dados**

A investigação em sala de aula contou com a utilização de dois instrumentos de pesquisa: questionários e mapas conceituais. Estes instrumentos foram importantes, tanto para a coleta dos dados como para a interpretação e discussão destes. O uso de diferentes instrumentos visou a obtenção de indícios da

Aprendizagem Significativa (AS) com a aplicação da Sequência Didática (SD) desenvolvida.

Vejamos, a seguir, a descrição de cada instrumento utilizado nesta pesquisa:

- Mapas conceituais são diagramas de significados, de relações significativas; de hierarquias conceituais (MOREIRA, 1997). Segundo este autor, mapas conceituais podem ser elaborados segundo um modelo hierárquico no qual conceitos mais inclusivos estão no topo da hierarquia (parte superior do mapa) e conceitos específicos, pouco abrangentes, estão na base (parte inferior). Setas podem ser utilizadas para dar um sentido de direção a determinadas relações conceituais.

Acreditamos que a construção destes mapas conceituais ajudaria na negociação de significados entre professores e alunos, servindo também, como ferramenta importante para evidenciar a AS, além de poder fazer parte do processo avaliativo (MOREIRA, 1997).

Ao longo da aplicação da SD, propomos a elaboração de duas versões de mapas conceituais, cada uma em distintos momentos, para que fosse possível a constatação da sua evolução.

- Questionário, segundo Gil (1999, p. 128), pode ser definido “como a técnica de investigação composta por um número mais ou menos elevado de questões apresentadas por escrito às pessoas, tendo por objetivo o conhecimento de opiniões, crenças, sentimentos, interesses, expectativas, situações vivenciadas etc.”. Na visão de Marconi & Lakatos (2003, p. 201), questionário é “um instrumento de coleta de dados, constituído por uma série ordenada de perguntas, que devem ser respondidas por escrito e sem a presença do entrevistador”.

Em nossa pesquisa construímos 5 questionários com a intenção de coletar os dados da pesquisa, também em diferentes momentos. Optamos por elaborá-los com questões abertas, problematizadoras e contextualizadas, por acreditar que questões

de cunho qualitativo possibilitariam uma melhor análise dos dados quando suas respostas fossem correlacionadas com o outro instrumento – mapas conceituais.

Nos próximos capítulos apresentaremos todos os instrumentos supracitados usados ao longo da pesquisa. Destacaremos a importância e finalidade de cada um para obtenção e discussão dos dados.

### **3.3 Contexto da pesquisa**

Esta seção aborda os aspectos que caracterizam a instituição de ensino, os sujeitos envolvidos na investigação e a relação entre as partes inseridas no contexto escolar.

#### **3.3.1 Local da Pesquisa**

A instituição em que foi realizada a pesquisa faz parte da Rede Pública do Estado da Bahia, localizada na cidade de Serrinha, é referência no ensino público da região entre as escolas de nível médio. A escola é de médio porte e pouco estruturada: com 15 salas de aulas, 1 sala utilizada como almoxarifado, 1 sala de laboratório/outras atividades, 1 sala de informática, 1 biblioteca, 1 sala para professores e 2 salas para fins administrativos. Em seus três turnos de funcionamento, professores e alunos podem usufruir de recursos como dispositivos audiovisuais (“TV Pendrive”, Datashow e som), um kit de laboratório das áreas de biologia e química (com uma grande quantidade de itens faltantes) e alguns computadores disponibilizados na sala de informática.

Vale destacar que a sala de informática é geralmente utilizada como sala para projeção de *slides* pelos professores e dificilmente os computadores são usados pelos membros da escola. Os computadores apresentam problemas de hardware e de software. Muitos dos acessórios como mouses, teclados e fones de ouvido encontram-se com problemas técnicos. Além disso, o acesso à internet é bem limitado por constantes erros de configuração e falta de suporte dos técnicos de rede.

As salas de aulas são agradáveis para professores e alunos devido à ventilação natural e boa iluminação artificial. Entretanto, um dos grandes problemas apontados pelos professores e alunos é a poluição sonora nas salas. Muitas delas

fazem contato direto com ruas transitadas por carros e motos que geram ruídos intensos e irritantes para os membros da escola. Outro grande problema de grande incômodo em algumas salas é a intensidade de calor proveniente do Sol que entra diretamente pelas janelas. Para agravar esta situação, muitos dos ventiladores das salas não funcionam, e os poucos que funcionam geram intensos ruídos.

A escola é constituída, em grande parte, por professores concursados e pós-graduados em suas devidas áreas de atuação. Nos últimos anos a troca de professores para lecionar a disciplina de Física tem sido considerável diante da dificuldade de encontrar professores aptos e preparados para ensinar a área. Muitas vezes alguns profissionais temporários ocupam o cargo ou, como geralmente ocorre, as vagas não são ocupadas, o que vem desestimulando os estudantes.

Estes, por sua vez, pertencem à classe média/baixa com muitas dificuldades na leitura, escrita, e resolução de problemas que envolvem equações matemáticas. Muitos precisam se deslocar de outras cidades ou de comunidades circunvizinhas e acordam cedo para embarcarem nos ônibus escolares coletivos. Geralmente, estes mesmos alunos alegam a necessidade de saírem mais cedo das últimas aulas para não perderem o transporte de retorno para suas casas.

Alguns estudantes já pertenceram a instituições da rede privada e demonstram certo domínio em alguns conteúdos de Física, no entanto, a maioria sempre estudou na rede pública e pouco conhecem as áreas científicas. Uma das principais características em comum destes jovens é o fácil acesso às novas tecnologias como *tablets* e *smartphones*. Estes dispositivos são vistos pelos professores da escola como os grandes vilões em suas práticas pedagógicas. Muitos apontam a dificuldade de concentração dos alunos em suas aulas expositivas como limitadora da aprendizagem.

Outro problema que pode ser destacado é a dificuldade dos alunos em solucionar questões das áreas científicas, principalmente das disciplinas de Física e Matemática. Em muitos casos, os estudantes trazem de suas casas listas não respondidas e apontam, inclusive, empecilhos que justificariam a não resolução de questões tais como: a falta de concentração, materiais didáticos incipientes, dificuldades em interpretar questões, carga horária excessiva de trabalho, elevado tempo em que se dedicam às mídias e às redes sociais, falta de afinidade com as disciplinas, etc.

### **3.3.2 Sujeitos Participantes e Critério de Inclusão**

A intervenção em sala de aula contou com a participação voluntária de 31 estudantes de uma turma específica da 3ª Série do Ensino Médio.

A escolha da turma baseou-se, primordialmente, no conhecimento e habilidade dos alunos na construção de mapas conceituais, principal instrumento de coleta de dados utilizado durante a aplicação do produto de pesquisa.

Outro critério levado em conta para a escolha da turma foi a expectativa em cumprir com o plano de aulas, devido à geminação dos horários de aulas. Outras turmas de 3º ano possuíam apenas um horário diário, o que poderia dificultar o cumprimento da carga horária proposta.

### **3.3.3 Aspectos éticos da pesquisa envolvendo seres humanos**

É importante destacar que os instrumentos de coleta – questionários e mapas conceituais – tiveram códigos para identificar cada sujeito voluntário da pesquisa. Para os questionários destinados à turma, por exemplo, foram gerados uma série de códigos de barras com a identificação de cada estudante: “Estudante 01”, “Estudante 02”, “Estudante 03”, ..., “Estudante 31”. Somente alguns dispositivos eletrônicos com leitores ópticos podiam decifrar estes códigos, o que praticamente garantiu o anonimato da pesquisa. Os mapas conceituais, na medida em que foram construídos pelos sujeitos, eram identificados com os mesmos códigos pelo professor, de forma manual e discreta durante as aulas.

Estes códigos foram sorteados entre os sujeitos com auxílio de um software e somente o professor tinha conhecimento deste sorteio. Apenas avisamos que estes eram inerentes à pesquisa, e que o anonimato seria garantido. Julgamos esta estratégia como algo fundamental para posterior análise dos dados, pois nos permitiu avaliar a AS, assim como, a assimilação de determinados conceitos e teorias da FMC por alguns estudantes.

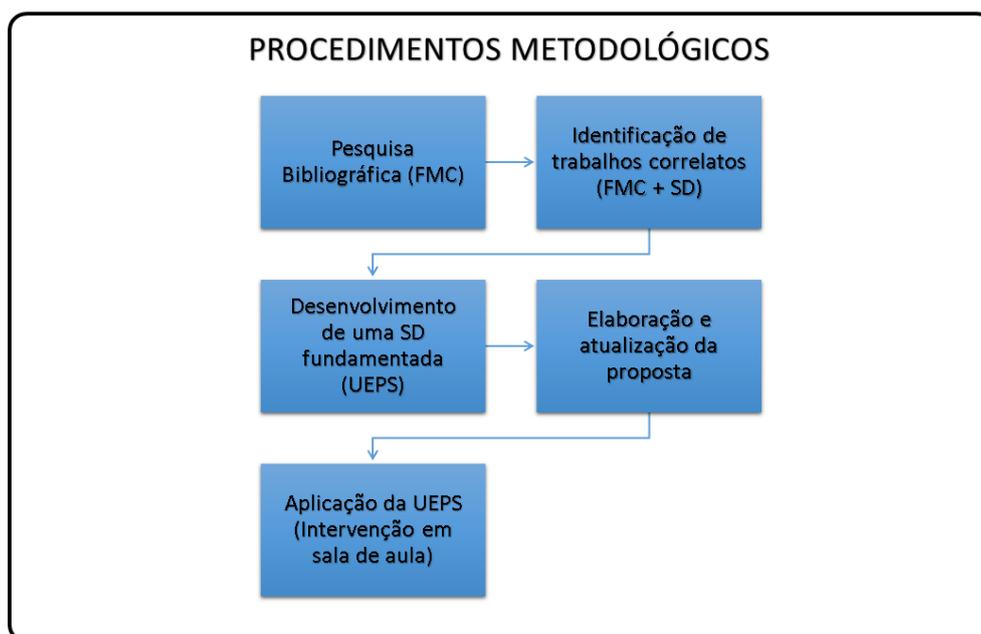
A intervenção em sala de aula somente foi iniciada após o consentimento dos alunos e/ou responsáveis. Os 31 alunos da turma, regularmente matriculados, tiveram que, voluntariamente, assinar um Termo de Assentimento Livre e Esclarecido (TALE) demonstrando seu interesse voluntário em participar da pesquisa. Este e outro termo

– o TCLE (Termo de Consentimento Livre Esclarecido) – destinado aos responsáveis dos alunos apresentavam detalhes da intervenção como o tema de pesquisa, procedimentos metodológicos e contribuição dos estudantes durante o processo participativo e avaliativo. O TCLE e TALE podem ser visualizados nos Apêndices 06 e 07, respectivamente.

### 3.4 Procedimentos Metodológicos

Este capítulo busca descrever o delineamento da pesquisa, no que diz respeito aos procedimentos metodológicos de construção do produto educacional e sua intervenção para a coleta e análise de dados.

A Figura 19 representa um esquema das etapas que fizeram parte dos procedimentos metodológicos da pesquisa.



**Figura 19.** Esquema dos Procedimentos Metodológicos da Pesquisa.

Estes passos foram imprescindíveis para a efetivação da pesquisa. Buscamos, inicialmente, por materiais que relatassem o contexto atual do Ensino da Física no Ensino Médio. Fizemos também uma vasta pesquisa na internet a procura de trabalhos com sugestões de propostas didáticas (devidamente fundamentadas) para a inserção dos conteúdos da FMC, principalmente que partissem do conteúdo da Física dos Semicondutores.

No final destas pesquisas, poucos trabalhos correlatos foram encontrados, e identificamos a escassez de propostas voltadas para o Ensino Médio relacionadas com o tema da Física dos Semicondutores. Com isso, passamos a idealizar uma proposta que permitisse a discussão de alguns tópicos da FMC a partir dos Semicondutores – um conteúdo amplo que inclui conceitos da Física Quântica.

Desenvolvemos uma Sequência Didática (SD) com o objetivo principal de apresentar e discutir conteúdos contemporâneos, como quantização, dualidade onda-partícula, ondas de matéria, níveis de energia e formação de bandas nos sólidos, princípio da incerteza, recombinação, saltos quânticos e formação elétron-buraco, partindo de fenômenos corriqueiros do dia a dia, como o Efeito Fotovoltaico (EF) e a Eletroluminescência.

É bem possível que estes fenômenos, facilmente evidenciados em dispositivos modernos como os painéis fotovoltaicos e LEDs, respectivamente, já tenham sido questionados pelos estudantes.

O efeito fotovoltaico, fenômeno físico que explica obtenção da energia elétrica através da incidência de luz em placas fotovoltaicas, por exemplo, é um fenômeno que já faz parte da vida dos jovens e seus fundamentos quânticos menos inclusivos<sup>8</sup> podem ser direcionados aos estudantes da educação básica numa tentativa de garantir a Aprendizagem Significativa (AS) e a apropriação de novos significados da Física.

Estes fenômenos ocorrem em alguns dispositivos eletrônicos constituídos, basicamente, por junções de materiais semicondutores dopados. Conhecer as propriedades de condução elétrica destes materiais é, por exemplo, de fundamental importância para o desenvolvimento de uma SD que parte desta problematização. Para isto, foi necessário buscar por materiais que explorassem a Física do Estado Sólido, como veremos a seguir.

### **3.4.1 Pesquisa Bibliográfica**

Fizemos, inicialmente, um levantamento do material teórico que contextualizasse os desafios atuais do Ensino da Física no Brasil. Esse estudo nos serviu para compreender os inúmeros problemas encontrados na educação brasileira.

---

<sup>8</sup> Conteúdos mais específicos de uma teoria mais geral e inclusiva.

Como vimos no Capítulo 1, muitos autores relataram a falta e/ou despreparo dos professores, as más condições de trabalho, o reduzido número de aulas no Ensino Médio e a progressiva perda de identidade da Física no currículo (MOREIRA, 2014).

Boa parte dos recentes trabalhos passaram, a partir desta problemática, a sugerir inovações curriculares, com a inserção das descobertas da Física dos séculos XX e XXI no Ensino Médio. Levados por uma corrente de pesquisadores da área de Ensino de Física, idealizamos uma Sequência Didática (SD) problematizando a Física dos Semicondutores para a ensinar tópicos da FMC.

Com isso, tivemos que realizar uma extensa pesquisa em livros, artigos, teses e em outros materiais da internet, que abordassem a Física dos Semicondutores. Boa parte dos materiais consultados foi da área da Física do Estado Sólido ou Física da Matéria Condensada.

Foi imprescindível para o desenvolvimento desta pesquisa, o reconhecimento das contribuições da Física Quântica na formação de bandas de energia dos sólidos semicondutores, por exemplo, a partir destes materiais consultados. Esta vasta pesquisa bibliográfica foi realizada visando a assimilação de conceitos básicos da Física dos Semicondutores, bem como para a elaboração da SD. Com este estudo, elaboramos boa parte do aprofundamento teórico presente no Capítulo 2.

Finalizamos a consulta com a análise de alguns livros didáticos, geralmente adotados nas escolas de ensino médio da região, verificando quais autores trabalhavam com esses assuntos e a forma como eram tratados e relacionados com a FMC. Constatamos que boa parte dos livros consultados não abordam a Física dos Semicondutores correlacionada com a Física Quântica. Alguns autores optam por reservar um espaço, geralmente no final dos capítulos, apenas para apresentar a contribuição dos semicondutores em dispositivos do dia a dia.

A Pesquisa Bibliográfica realizada contribuiu para que pudéssemos obter alguns referenciais para construção da Sequência Didática idealizada.

### **3.4.2 Identificação de trabalhos correlatos**

A etapa inicial que antecedeu a elaboração da Sequência Didática (SD) consistiu numa consulta exaustiva na internet, em sites que hospedam trabalhos científicos que abordassem a inserção de tópicos da FMC e que tivesse como ponto

de partida o estudo dos dispositivos semicondutores. A busca foi feita tanto em sites de busca da WEB como em repositórios dos principais periódicos da área de Ensino de Física como a Revista Brasileira de Ensino de Física e o Caderno Brasileiro de Ensino de Física.

Na consulta utilizamos várias combinações de palavras-chave como: “Semicondutores”; “Ensino de Física”; “Física Quântica”; “LED”; “fotocélula”; “painel solar”; “Física Moderna”; “FMC”; dentre outros termos. No entanto, foram encontrados apenas alguns artigos ou trabalhos que elencavam conceitos da FMC, mas com propostas de experimentos que pudessem ser realizados em sala de aula. Trabalhos relacionados com estratégias de ensino da FMC a partir dos dispositivos semicondutores não foram encontrados.

Apenas um trabalho que fora divulgado na Revista Brasileira de Ensino de Física relacionava ensino e semicondutores. Intitulado como “Construcción de significados de Física de Semiconductores en Educación secundaria: Fundamentos y resultados de una investigación” (CARMONA, 2006), este trabalho<sup>9</sup> consistia numa investigação que visava integrar as noções básicas da física de semicondutores, como “conceito de buraco”; “movimento dos portadores de carga”; “processos de recombinação e geração de pares elétron-buraco”; dentre outros. A experiência ocorrida em sala de aula, na cidade de Sevilla (Espanha), não se referia à abordagem de conceitos da Física Quântica a partir de algumas tecnologias ou de dispositivos semicondutores, ou até mesmo a partir do semicondutor.

Em seu trabalho, Carmona (2006) concluiu que os estudantes do ensino básico apresentaram concepções “padrões” para o comportamento elétrico dos semicondutores. Além disso, o trabalho evidenciou algumas inconsistências das respostas dadas pelos alunos em algumas questões e relata dificuldades de aprendizagem. Carmona (2006) reconhece que sua pesquisa é apenas uma iniciativa para que a “Física dos Semicondutores” possa ser direcionada ao ensino. Segundo o autor, alguns conceitos básicos devem ser reforçados na educação e sugere a continuação da sua investigação.

âmbito aún poco explorado en la Didáctica de la Física. (...) creemos que son un referente importante con vistas a emprender mie vas investigaciones. Que

---

<sup>9</sup> Disponibilizado na revista v. 28, n. 4. 2006

profundicen en los aspectos aqui expuestos, y arrojen luz a la problemática planteada. (CARMONA, 2006, p. 518)

Pudemos constatar na consulta destes materiais a escassez de novas estratégias direcionadas ao ensino visando à inserção de tópicos da Física Moderna a partir dos dispositivos eletrônicos. Algumas propostas, como a de Carmona (2006), apenas contribuíram no sentido de fortalecer a assimilação de alguns tópicos da Física dos Semicondutores.

### **3.4.3 Elaboração da Sequência Didática**

Visando a inserção de alguns tópicos da Física Moderna e Contemporânea (FMC) no nível médio, buscamos implementar uma Sequência Didática (SD) inédita e diferenciada no Ensino Médio (EM) com o intuito de proporcionar a Aprendizagem Significativa (AS) de conceitos de Física Quântica (FQ).

Buscamos não somente a simples construção de uma SD, no sentido de aglomerar uma determinada quantidade de aulas, como também visamos aprimorar algumas práticas didáticas a partir de uma série de problematizações e indagações e uso intensivo de recursos computacionais, como por exemplo, simulações virtuais.

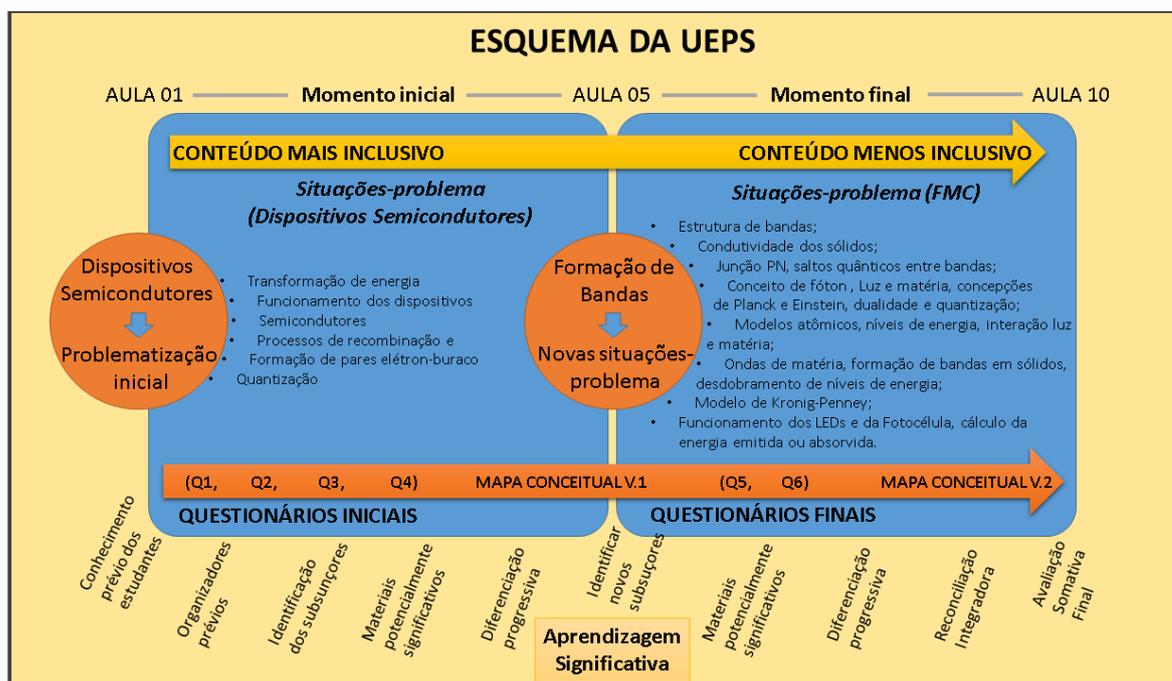
Construímos a SD seguindo alguns métodos sugeridos por alguns autores que pudessem contribuir para o processo de ensino-aprendizagem em sala de aula. Isto é, partimos da hipótese de que os objetivos da pesquisa seriam melhor alcançados se o processo de construção do produto de pesquisa (SD) e sua intervenção em sala de aula estivessem relacionados com as Teorias de Aprendizagem.

Optamos pelo modelo de SD idealizado por Moreira (2011b) – uma UEPS (ou Unidade de Ensino Potencialmente Significativa). No processo de sua construção e implementação, focamos na inclusão de alguns princípios e aspectos sequenciais (ou passos), referidos por Moreira (2011b). A UEPS foi fundamentada na Teoria de Aprendizagem Significativa de David Ausubel e, portanto, a estrutura da sequência elaborada foi constituída de elementos imprescindíveis e inerentes à sua teoria de aprendizagem, como o “conhecimento prévio”, a “disposição em aprender”, os “organizadores prévios”, “subsunçores”, “diferenciação progressiva”, “reconciliação integradora”, dentre outros, apontados também nos trabalhos de Moreira.

Além disso, os aspectos transversais apontados pelo mesmo autor, e evidenciados na Seção 2.4.2, foram também explorados para enriquecer ainda mais a UEPS. Entendemos que tais posturas foram de fundamental importância para permitir um real significado de conteúdos no momento de sua apresentação ao aluno, o que corrobora com as ideias da UEPS de Moreira (2011b).

Cada versão elaborada foi constituída por uma série de materiais educacionais e estratégias diversificados que estimulassem o diálogo e a crítica em situações-problemas, relacionadas com o tópico mais inclusivo numa linha teórica construtivista onde se respeitasse, inicialmente, as ideias prévias dos alunos. Os materiais educacionais foram usados tanto para explorar os subsunçores dos estudantes, como também para facilitar o processo de ancoragem de novos conceitos e teorias da Física Quântica.

O esquema a seguir mostra a sequência hierárquica dos conceitos e teorias que foram abordados e os aspectos considerados para a construção da UEPS.



**Figura 20.** Esquema da UEPS elaborada (versão final) levando-se em consideração os instrumentos da Pesquisa.

Neste esquema, observa-se também os instrumentos usados na intervenção da Pesquisa (aplicação da UEPS em sala de aula) para coleta de dados. “Q1”, “Q2”, “Q3”, “Q4”, “Q5” e “Q6” foram os questionários aplicados ao longo da Pesquisa. Além

desses instrumentos de coleta de dados, propomos a elaboração de duas versões de mapas conceituais.

4 (quatro) versões de UEPS foram elaboradas ao longo deste trabalho, considerando-se os aspectos da fundamentação teórica como a Teoria de Bandas e os Pressupostos Pedagógicos (Teoria Ausubeliana e UEPS de Moreira).

As primeiras versões foram consideradas complexas por apresentarem dois tratamentos da Teoria de Bandas (ver Apêndice 02), o que corroborou com a dificuldade de sua implementação em sala de aula. Nestas versões, algumas aulas tinham como objetivo a discussão da Teoria dos Orbitais Moleculares (apresentado na Seção 2.2.1), como forma de justificar a sobreposição das funções de onda para o elétron (compartilhado).

Entretanto, como vimos, o tratamento equivalente para o problema seria possível com a abordagem apresentada na Seção 2.2.2). Com isso, as novas versões construídas tornaram-se mais simples no sentido de demonstrar o desdobramento dos níveis de energia dos elétrons, e pôde fornecer os principais fundamentos para formação de bandas nos sólidos, que seria evidenciado com uma simulação do Modelo de Kronig-Penney.

#### **3.4.4 Evolução da UEPS**

O esquema de UEPS apresentado anteriormente foi praticamente estabelecido desde a primeira versão elaborada. Apenas algumas aulas foram modificadas para que fossem considerados mais aspectos da Teoria Ausubeliana.

A primeira aula da primeira versão elaborada (Apêndice 02), por exemplo, passou por pequenas mudanças. A proposta previamente planejada não contribuiria satisfatoriamente para a discussão das transformações de energia, em que se deveria considerar o elevado grau de inclusividade dos conteúdos. Apenas mostrando dispositivos semicondutores em funcionamento, provavelmente poucas concepções prévias seriam evidenciadas num primeiro momento, pelos estudantes.

Optamos, então, por mostrar outros dispositivos eletroeletrônicos em funcionamento, como lâmpadas incandescentes e fluorescentes, muito comuns na vida destes estudantes, como também mostramos os dispositivos optoeletrônicos,

como lâmpadas de LED e fotocélula. Estes últimos passaram a ser destaques ao longo da UEPS, nas versões futuras.

O segundo momento da sequência de aulas da primeira versão elaborada, outro exemplo em destaque, foi modificada por uma versão que buscava identificar, inicialmente, as ideias prévias dos estudantes acerca da luz e matéria. As principais características, fenômenos e propriedades da luz e da matéria, quando compartilhados entre os estudantes, poderiam, então, contribuir para a construção de novos subsunçores que facilitariam a compreensão de novos conceitos.

Estas mudanças ocorreram desde a primeira aula, mas, principalmente, após a concessão dos conhecimentos prévios dos alunos. Outras alterações necessárias estavam relacionadas com a experiência docente, o contexto escolar, a proposta curricular e os conteúdos já trabalhados, significância do conhecimento, aspectos motivacionais, teorias pedagógicas e de aprendizagem, além de algumas restrições educacionais identificadas durante a aplicação da UEPS.

A última versão construída e aplicada em sala de aula (Apêndice 03), foi dividida em 10 aulas (com duração estimada de 50 minutos cada), constituídas, geralmente, por uma questão ou situação-problema e por alguns materiais educacionais (potencialmente significativos). Agrupamos a sequência proposta em semanas/aulas, pois pretendíamos aplicar a UEPS durante as próprias aulas letivas da disciplina de Física. Esta versão será melhor apresentada no Capítulo 4.

### **3.4.5 Aplicação da Sequência Didática em sala de aula**

A sequência de aulas da UEPS foi aplicada pelo professor-pesquisador durante a III unidade do ano letivo de 2015 numa instituição da rede pública de ensino num período consecutivo de 5 semanas (carga horária total de 500 minutos). Estas aulas, direcionadas a uma turma específica da 3ª Série do Ensino Médio, ocorreram nas segundas-feiras, das 10:20h, logo após o término do intervalo, até às 12:00h, compatíveis com as aulas letivas da disciplina de Física,

A turma escolhida tinha 31 alunos devidamente matriculados e boa parte destes tinha boa frequência nas aulas de Física. Alguns sujeitos voluntários da pesquisa trabalhavam em turnos opostos e, além disso, a escola não dispunha de salas para que estas aulas pudessem ocorrer em outros turnos, o que inviabilizou a

aplicação da UEPS em outro momento que não interferisse a sequência de aulas letivas.

No Capítulo 5 será abordado, detalhadamente, como ocorreu a aplicação da UEPS. Serão evidenciadas as estratégias para a problematização dos conteúdos e alguns recursos utilizados em determinados momentos da sua intervenção. Da mesma forma, cada instrumento usado na pesquisa para coleta dos dados será identificado com base na Sequência Didática elaborada.

### **3.4.6 Tratamento e Análise dos Dados Obtidos**

Aqui trataremos dos procedimentos e estratégias para coleta e análise dos resultados da pesquisa.

#### **3.4.6.1 Coleta dos dados**

Como foi dito na Seção 3.2, dois instrumentos de coleta foram usados na pesquisa. Os cinco questionários foram usados em diferentes momentos da UEPS, cada qual com um diferente propósito educacional. Os mapas conceituais foram usados para a coleta de dados referentes ao processo de hierarquização das ideias estruturadas pelos estudantes.

Os Questionários 1, 2 e 3 (Apêndices 08, 09 e 11, respectivamente) foram usados, principalmente, para coleta de informações relacionadas às concepções prévias dos estudantes, antes da inserção dos conteúdos da FMC. Constituídos por questões abertas, estes não possuíam a função de verificação da Aprendizagem Significativa (AS) dos conceitos da Física Moderna, ao contrário dos Questionários 4 e 5 (Apêndices 12 e 13, respectivamente). Como evidenciado nestes apêndices, os questionários apresentam as mesmas questões, no entanto, foram aplicados em momentos distintos, com diferentes propósitos.

O Questionário 4 foi usado na intervenção em sala de aula, para coletar informações referentes à AS de alguns conceitos básicos da Física dos Semicondutores, mas também para verificar as concepções prévias dos estudantes quanto a alguns tópicos da FMC. Concepções prévias por que boa parte dos conteúdos não seriam abordados até o momento de sua aplicação.

O mesmo questionário (nomeado de Questionário 5) foi usado na pesquisa com outra finalidade: constatar AS dos conceitos da Física Quântica abordados após as estratégias de ensino direcionadas à turma.

O Questionário 6 (Apêndice 14) foi utilizado como parte do processo avaliativo final. Procuramos construí-lo a partir de questões de vestibulares que contemplassem os conteúdos de FMC pertinentes à UEPS, devido ao fato de que muitos estudantes da 3ª Série são, geralmente, submetidos à processos seletivos.

No entanto, encontramos dificuldades para encontrar questões mais elaboradas, em livros e na internet, com questionamentos sobre semicondutores e dispositivos optoeletrônicos. Questões sobre quantização, modelos atômicos e conceitos básicos da FMC foram facilmente encontrados na rede. Apenas a Questão 09 deste questionário exigiria dos estudantes habilidade com as ferramentas matemáticas básicas.

Identificaremos cada instrumento de coleta usado na pesquisa nos próximos capítulos.

### **3.4.6.2 Categorias de Análise**

Para sistematizar a análise dos dados obtidos dos dois instrumentos de coleta, optou-se pela adoção de categorias de análise, compatíveis com a pesquisa qualitativa. A intenção ao estabelecer tais categorias é a de agrupar elementos em torno de uma ideia mais inclusiva capaz de sintetizar e classificar a análise cuidadosa dos resultados.

Pode-se considerar a Aprendizagem Significativa (AS) como a ideia mais inclusiva por englobar boa parte dos aspectos da Teoria Ausubeliana considerados também na análise. Com base nestes aspectos, as duas categorias de análise estabelecidas foram: “Aprendizagem Significativa: desafios da aplicação da UEPS” e “Aprendizagem Significativa: possibilidades da aplicação da UEPS”.

Critérios de análise foram usados na análise destas categorias. O primeiro critério de análise foi a apreciação dos mapas conceituais. Aspectos da Teoria de Aprendizagem de Ausubel como a hierarquização das ideias, a diferenciação progressiva e reconciliação integrativa, tiveram a função de indicar a Aprendizagem Significativa dos conceitos mais gerais e os menos inclusivos.

Além disso, outro importante critério de análise adotado foi a comparação das respostas dos questionários menos inclusivos. Estes indicadores devem também ser considerados pois, tanto estes questionários como os mapas conceituais, foram aplicados simultaneamente em algumas aulas da UEPS.

Os resultados da pesquisa qualitativa foram sustentados com a utilização da técnica de triangulação metodológica. Ou seja, os múltiplos métodos de obtenção de dados (da aplicação de diferentes instrumentos de coleta) foram combinados de forma a garantir maior riqueza das informações da Aprendizagem Significativa. Segundo Azevedo et al (2013), o método da triangulação visa

não apenas [para] examinar o fenômeno sob o olhar de múltiplas perspectivas, mas também [para] enriquecer a nossa compreensão, permitindo emergir novas ou mais profundas dimensões. Ela contribui para estimular a criação de métodos inventivos, novas maneiras de capturar um problema para equilibrar com os métodos convencionais de coleta de dados. (AZEVEDO, OLIVEIRA, & GONZALEZ, 2013, p. 4)

Nesta perspectiva, as informações advindas da análise dos dados do Questionário 6 podem ser usadas para corroborar a análise qualitativa do problema de pesquisa.

Vale destacar que, por causa da complexidade que envolve uma pesquisa na área educacional, tratar cada categoria de análise distintamente se torna um desafio à parte. No ambiente escolar, além da influência de fatores internos, inerentes à pesquisa, fatores de origem externa tais como a frequência e atenção, podem dificultar a Aprendizagem Significativa. Neste sentido, podem ser identificados, a partir dos critérios de análise, casos isolados (e até mesmo conflitantes) em cada categoria, durante a análise sistematizada dos dados.

#### 4. UMA UEPS PARA AS AS DE TÓPICOS DA FMC A PARTIR DOS DISPOSITIVOS SEMICONDUTORES

O esquema a seguir mostra a seqüência hierárquica dos conceitos e teorias que foram abordados e os aspectos considerados para a construção da UEPS.

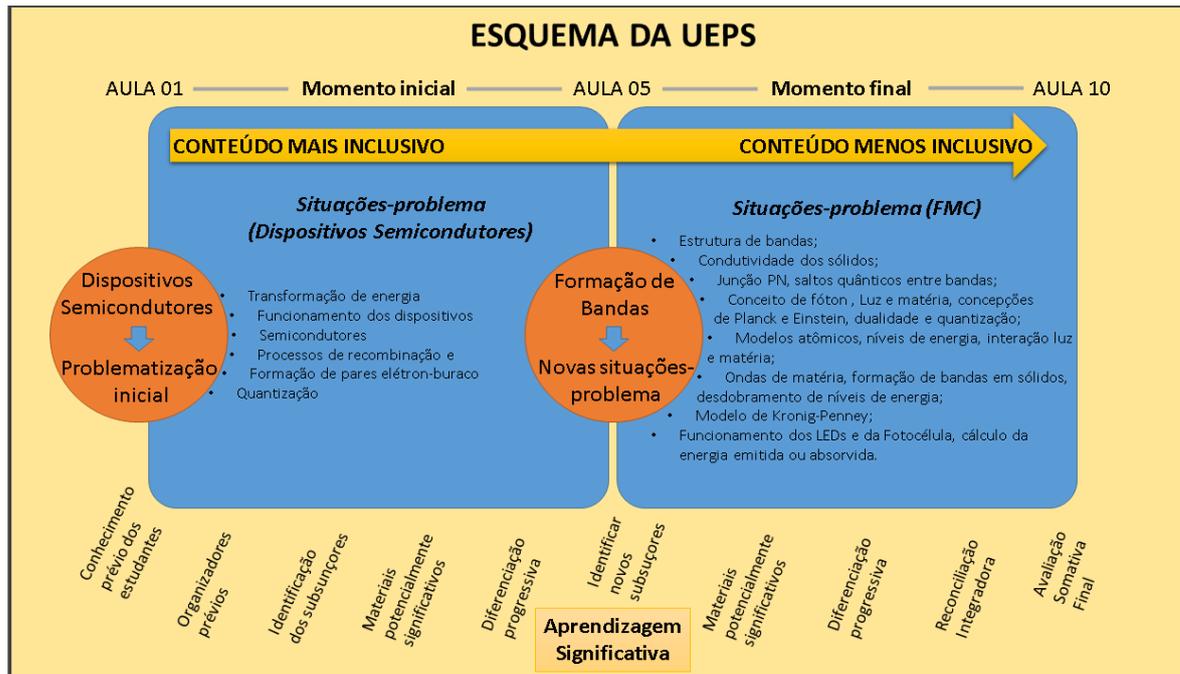


Figura 21. Esquema da UEPS elaborada (versão final).

Cada aula da última versão da UEPS elaborada será apresentada através de quadros (semanais), onde os principais objetivos e estratégias de ensino propostos de acordo com os princípios educacionais e os aspectos sequenciais da UEPS de Moreira foram destacados. Nestes quadros, apresentaremos, detalhadamente, as especificidades epistemológicas, metodológicas e pedagógicas:

Semana/Aula	Objetivos principais das aulas (aspectos epistemológicos)	Princípios da Teoria Ausubeliana e aspectos sequenciais	Estratégias didáticas e processos avaliativos.
<b>Semana 01 (Aula 01)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Apresentar o planejamento de aulas e seus objetivos para os estudantes;</li> <li>• Identificar o conhecimento prévio dos estudantes acerca dos dispositivos semicondutores;</li> <li>• Propor discussões sobre o funcionamento de dispositivos eletrônicos – LEDs e Fotocélula.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Apresentar o tópico a ser abordado;</li> <li>• Externalizar o conhecimento prévio dos estudantes;</li> <li>• Identificar os subsunçores a partir das ideias iniciais;</li> <li>• Propor situações-problemas num nível bem introdutório;</li> <li>• Ensinar a partir do que o aluno já sabe;</li> <li>• Identificar a disposição em aprender o assunto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Situação-problema:</b> Como o LED e a fotocélula funcionam? (Estender para dispositivos semicondutores);</li> <li>• Mostra de dispositivos: lâmpadas incandescentes, fluorescentes e lâmpadas de LEDs; kit robô solar.</li> <li>• <b>Situação-problema:</b> quais as conversões de energia evidenciadas nesses dispositivos?</li> <li>• Questionário 1 - após a apresentação da UEPS – Nível geral e mais inclusivo – identificação dos conhecimentos prévios.</li> <li>• Solicitar que o estudante externalize sua disposição em aprender.</li> </ul>
<b>Semana 01 (Aula 02)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificar o conhecimento prévio dos estudantes quanto ao material presente nos dispositivos vistos na primeira aula;</li> <li>• Estudar os dispositivos semicondutores: estrutura cristalina dos átomos de silício, dopagem, junção PN, influência da luz e calor; funcionamento dos diodos e LEDs, etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utilizar materiais potencialmente significativos – Hipermídia (função: organizadores prévios);</li> <li>• Propor atividade colaborativa;</li> <li>• Propor situações-problemas num nível bem introdutório;</li> <li>• Utilizar de recursos computacionais;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Situação-problema:</b> Qual o tipo de material utilizado nestes dispositivos?</li> <li>• Utilização de uma hipermídia para explorar as características dos semicondutores.</li> <li>• Questionário 2 - após a interação dos alunos com a hipermídia (atividade colaborativa).</li> </ul>

**Quadro 1.** Descrição da UEPS – Semana 01 (Aulas 01 e 02).

Como ponto de partida, foi estabelecido um tema gerador: *O funcionamento de alguns dispositivos semicondutores*. Este tema gerador possui elevado grau de inclusividade de conceitos da FMC e tem como objetivo propiciar o início de toda problematização. Especificamente, a proposta inicial foi problematizar o funcionamento dos LEDs e da fotocélula (conhecidos também como painéis fotovoltaicos).

Muitos destes dispositivos já estão presentes em nossas vidas e podem servir como objetos propulsores importantes para explorar conceitos mais específicos como teorias, princípios e fenômenos físicos da FMC. Como já foi dito, somente a Física Quântica consegue descrever satisfatoriamente o funcionamento destes e outros dispositivos eletrônicos.

A mostra da evolução de lâmpadas residenciais e dos dispositivos semicondutores em funcionamento, proposto na primeira aula, visa a discussão do

conteúdo mais geral a partir de suas concepções prévias dos alunos da turma. A ideia é focar nas transformações de energia constatadas nesta intervenção.

A partir desta problematização inicial, devidos questionamentos e indagações dos alunos precisarão ser sanados, com a concepção de novas teorias e conceitos, considerando-se ainda o elevado grau de inclusividade de conteúdos. Novas ideias provavelmente surgirão de conceitos ancoradores apresentados de diversos materiais educacionais: hipermídias, simulações, vídeos, animações e imagens.

A utilização da hipermídia, por exemplo, proposta na segunda aula, foi escolhida para facilitar a abordagem inicial dos semicondutores e para identificação das principais características destes materiais. Este recurso pode contribuir no processo de assimilação de novos conceitos como ligações químicas covalentes, dopagem, condutividade elétrica, dentre outros.

Semana/Aula	Objetivos principais das aulas (aspectos epistemológicos)	Princípios da Teoria Ausubeliana e aspectos sequenciais	Estratégias didáticas e processos avaliativos.
<b>Semana 02 (Aula 03)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Identificar o conhecimento prévio dos estudantes quanto ao funcionamento dos LEDs e da Fotocélula;</li> <li>Estudar as transformações de energias em dois experimentos: térmica, luminosa e elétrica;</li> <li>Buscar a diferenciação dos LEDs e da fotocélula quanto ao seu funcionamento;</li> <li>Descrever fisicamente os fenômenos envolvidos num nível mais geral.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Socializar respostas do questionário anterior;</li> <li>Propor situações-problemas num nível exploratório;</li> <li>Utilizar materiais potencialmente significativos – Experimentos em sala (função: organizadores prévios);</li> <li>Propor atividade colaborativa – Interação dos estudantes (Professor como mediador);</li> <li>Destacar e exemplificar alguns tipos de materiais semicondutores;</li> <li>Identificar novos subunçores (ex.: novas ideias surgiram após a hipermídia?);</li> <li>Propor novas situações-problemas. Ex.: como o LED gera luz? E como a fotocélula construída por Fotodiodos pode gerar corrente elétrica? (Levando em conta o conhecimento prévio dos estudantes)</li> <li>Identificar as ideias abordadas na hipermídia que foram ancoradoras para o novo conhecimento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Situação-problema:</b> Diodos podem emitir luz?</li> <li>Realização de dois experimentos em sala para explorar LEDs e a fotocélula.</li> <li>Questionário 3 - após a interação dos alunos e a realização dos experimentos em 2 grandes grupos (atividade colaborativa) – identificação de novas ideias.</li> <li>Socialização das respostas dos questionários – propor discussão entre os dois grupos formados.</li> </ul>

<p><b>Semana 02 (Aula 04)</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conceituar bandas de energia existente nos materiais semicondutores – nível bem introdutório;</li> <li>• Definir elétrons como partículas e lacunas como um tipo de “partícula” positiva – relação de simetria da Física;</li> <li>• Explorar o movimento de portadores de cargas (elétrons e lacunas);</li> <li>• Estudar o processo de recombinação e formação de pares elétron-buraco;</li> <li>• Diferenciar LEDs e fotocélula a partir dos processos supracitados;</li> <li>• Introduzir o conceito de quantização da luz (fótons) a partir dos saltos quânticos dos elétrons entre bandas evidenciando os processos de recombinação e formação de pares elétron-buraco;</li> <li>• Explicitar o nível de energia proibida – a energia de gap.</li> <li>• Sugerir a leitura de artigo sobre a constante de Planck e o funcionamento dos LEDs.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Propor novas situações-problemas num nível exploratório (Levando em conta o conhecimento prévio dos estudantes);</li> <li>• Utilizar materiais potencialmente significativos – Imagens, vídeos, animações e simulações (função: demonstrativos/ organizadores prévios para os novos conceitos);</li> <li>• Diferenciar LEDs e fotocélula a partir dos seguintes processos: recombinação e formação de pares elétron-buraco (diferenciação progressiva);</li> <li>• Propor novas situações-problemas. Ex.: o que deve definir a cor dos LEDs? (Levando em conta o conhecimento prévio dos estudantes)</li> <li>• Inserir novas ideias ancoradoras: saltos quânticos e quantização;</li> <li>• Identificar novos subsunçores (quais as novas ideias e hipóteses apontadas pelos estudantes ao tentar explicar a cor dos LEDs, por exemplo?)</li> <li>• Apresentar o conhecimento a ser ensinado/aprendido, levando em conta a diferenciação progressiva.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Situação-problema:</b> Afinal, como estes dispositivos funcionam? Como o LED emite luz? E como a luz pode gerar corrente elétrica?</li> <li>• Aula expositiva: Introdução do conceito de banda de energia a partir dos processos de recombinação e formação de pares elétron-buraco.</li> <li>• Realização de uma pequena dinâmica para demonstrar o movimento dos portadores de carga – elétrons são como estudantes que saem de suas cadeiras deixando lacunas (cadeiras vazias que se deslocam em sentido contrário).</li> <li>• Exibição de diversos Recursos Educacionais como imagens, animações, vídeos e simulações;</li> <li>• Discussão em sala de alguns conceitos oriundos da FMC – Quantização, saltos quânticos.</li> </ul>
---------------------------------------	--	--	---

**Quadro 2.** Descrição da UEPS – Semana 02 (Aulas 03 e 04).

Como indica o Quadro 2, nesta segunda semana de aulas, propõe-se a problematização do funcionamento dos dispositivos semicondutores.

Na Aula 03 os estudantes deverão realizar experimentos para constatar as conversões de energia evidenciadas na primeira semana de aulas. O primeiro experimento (Apêndice 10) consiste na construção de circuitos elétricos para acionar 3 tipos de LEDs transparentes<sup>10</sup>, mas que geram 3 tipos de cores distintas (vermelho, azul e branco). O Experimento 2 (Apêndice 10), proposto para outro grupo, solicita a construção de um painel solar constituído por Fotodiodos.

Nesta atividade colaborativa, o manuseio de elementos dos circuitos, além do manuseio dos instrumentos de medida, poderão facilitar o processo de ancoragem dos novos conceitos e a reconciliação integrativa do que foi evidenciado nas aulas anteriores. Além disso, a problematização do funcionamento destes dispositivos em

<sup>10</sup> Estes dispositivos, na verdade são Fotodiodos. Estes, além de emitir luz, como os LEDs, podem, também, ser utilizados para gerar eletricidade a partir da luz.

grande grupo pode fornecer indícios para a analogia e diferenciação dos fenômenos observados (recombinação e geração de pares elétrons-buracos) e destacados por cada grupo. Com isso, esta atividade experimental também pode facilitar o processo de diferenciação progressiva destes fenômenos.

Após a discussão dos experimentos em grande grupo, uma nova situação-problema é proposta na quarta aula da UEPS: *Afinal, como estes dispositivos funcionam?* A ideia desta aula é de apresentar e conceituar bandas de energia da maneira mais geral e inclusiva possível. Isto é, não há pretensão de explicar como estas bandas surgiram e o que, necessariamente, elas são. O objetivo geral da Aula 04 é diferenciar os processos de recombinação e geração dos pares elétron-buraco com a utilização de recursos que explorem os saltos quânticos entre as bandas de energia. Com esta intervenção, o professor pode indicar a quantização da luz emitida ou absorvida nos semicondutores.

As simulações foram utilizadas, principalmente, para compreensão de conceitos com elevado grau de abstração e com o intuito de minimizar esforços pelo professor em descrever os fenômenos. Assim, os saltos quânticos, a formação de pares elétron-buraco e o movimento de portadores de carga podiam ser melhor compreendidos com a utilização destes e outros materiais educacionais.

Semana/Aula	Objetivos principais das aulas (aspectos epistemológicos)	Princípios da Teoria Ausubeliana e aspectos sequenciais	Estratégias didáticas e processos avaliativos.
<b>Semana 03 (Aula 05)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conceituar bandas de energia existente nos materiais semicondutores – nível mais avançado – estrutura de bandas de alguns sólidos;</li> <li>• Exemplificar bandas dos sólidos identificando as bandas de valência e de condução;</li> <li>• Diferenciar os materiais quanto à condutividade;</li> <li>• Explicitar a condutividade dos materiais a partir da teoria de bandas;</li> <li>• Revelar a importância da junção PN no que tange ao direcionamento dos portadores de carga pela estrutura do sólido;</li> <li>• Identificar a simetria existente com a junção PN;</li> <li>• Explorar de forma introdutória as correntes de deriva e de difusão;</li> <li>• Retomar o conceito de quantização da luz (fótons) a partir dos saltos quânticos dos elétrons entre bandas evidenciando os processos de recombinação e formação de pares elétron-buraco;</li> <li>• Explicitar o nível de energia proibida – a energia de gap;</li> <li>• Evidenciar os tipos de recombinação para diferenciar os diodos e os LEDs.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Propor novas situações-problemas num nível exploratório e menos inclusivo;</li> <li>• Utilizar materiais potencialmente significativos – Imagens, vídeos, animações e simulações (função: demonstrativos/ organizadores prévios para os novos conceitos);</li> <li>• Inserir novas ideias ancoradoras: bandas de energia para diferenciação e classificação dos materiais;</li> <li>• Diferenciar os sólidos quanto à condutividade – como definir um semicondutor a partir da estrutura de bandas? (Diferenciação progressiva);</li> <li>• Propor novas situações-problemas. Ex.: o que deve definir a cor dos LEDs a partir da teoria de bandas? Qual a importância da junção PN?</li> <li>• Simular a junção de materiais NN, PP, e PN identificando as principais diferenças quando o semicondutor é ligado numa bateria. (Diferenciação progressiva);</li> <li>• Propor elaboração de um mapa conceitual (evidências da AS – progressivamente).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Situação-problema:</b> Porque estes dispositivos funcionam com a junção de dois materiais dopados, P e N? Porque os materiais semicondutores (que já possuem baixo gap) precisam ser dopados? Será que a junção PN é imprescindível para o funcionamento do LED e da Fotocélula?</li> <li>• Aula expositiva: noções gerais do conceito de bandas;</li> <li>• Exibição de diversos Recursos Educacionais como imagens, animações, vídeos e simulações;</li> <li>• Discussão em sala de alguns conceitos oriundos da FMC – Quantização, saltos quânticos e bandas de energia.</li> <li>• Questionário 4 – Nível menos inclusivo.</li> <li>• Construção do primeiro mapa conceitual a partir dos dispositivos semicondutores.</li> </ul>
<b>Semana 03 (Aula 06)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificar o conhecimento prévio dos estudantes acerca das propriedades e características da luz e da matéria;</li> <li>• Enunciar as concepções de Planck e de Einstein sobre a luz;</li> <li>• Conceituar a dualidade onda-partícula;</li> <li>• Diferenciar efeito fotoelétrico do efeito fotovoltaico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificar as concepções prévias dos estudantes sobre as propriedades da luz e da matéria;</li> <li>• Identificar novos subsunçores;</li> <li>• Reproduzir alguns documentários para enunciar concepções de alguns cientistas sobre a luz (Organizadores prévios);</li> <li>• Diferenciar as concepções clássicas e as concepções mais modernas sobre a luz (Diferenciação progressiva);</li> <li>• Enunciar o conceito de fóton a partir do efeito fotoelétrico de Einstein. (Ideia ancoradora para compreensão dos dispositivos semicondutores);</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Situação-problema:</b> Mas afinal, o que é a luz?</li> <li>• Escrever no quadro as palavras luz e matéria. Solicitar que os alunos identifiquem as principais características, fenômenos e propriedades da luz e da matéria;</li> <li>• Assistir a dois documentários sobre as concepções mais modernas sobre a luz como a dualidade onda-partícula;</li> <li>• Destacar a diferença básica entre os efeitos fotoelétrico e fotovoltaico.</li> </ul>

**Quadro 3.** Descrição da UEPS – Semana 03 (Aulas 05 e 06).

A Aula 05 pode ser considerada uma aula de transição entre dois momentos básicos da UEPS, como foi destacado no esquema da Figura 21. O primeiro momento abarcava um número de aulas para a problematização dos dispositivos semicondutores sem a preocupação com a inserção dos conteúdos da FMC. No segundo momento da UEPS, as estratégias de ensino levaram em conta a inserção de alguns tópicos da FMC, essenciais para a compreensão do funcionamento dos dispositivos semicondutores.

Portanto, a Semana 03 retoma a problematização do funcionamento dos LEDs e da Fotocélula, considerando as propriedades dos materiais semicondutores e os fenômenos abordados anteriormente, mas desta vez com a intenção de inserir as teorias da Física Moderna, como quantização (luz e matéria), saltos quânticos e caracterização das bandas de energia.

Muitos recursos educacionais como imagens, animações, vídeos e simulações foram inseridos na UEPS com o objetivo de facilitar a apresentação e discussão das concepções mais aceitas pelos cientistas. Além disso, a presença destes recursos nas Aulas 05 e 06 visava a Aprendizagem Significativa (AS) dos novos tópicos através do processo de diferenciação progressiva e reconciliação integradora. A partir desta proposta metodológica, estudantes poderão identificar a importância da junção PN para o funcionamento dos dispositivos, comparar a condutividade elétrica dos sólidos e dos diferentes tipos de materiais semicondutores, compreender o movimento dos portadores de carga e diferenciar com a corrente elétrica dos condutores.

Os vídeos (documentários) foram inseridos na Aula 06 com a função de organizadores prévios e propõem a representação dos fenômenos quânticos de forma dinâmica. Estes documentários discutem alguns conceitos fundamentais da FMC como quantização, dualidade, princípio da incerteza, etc. As imagens e animações tiveram sua importância para mostrar a formação de bandas a partir dos níveis atômicos.

Semana/Aula	Objetivos principais das aulas (aspectos epistemológicos)	Princípios da Teoria Ausubeliana e aspectos sequenciais	Estratégias didáticas e processos avaliativos.
<b>Semana 04 (Aula 07)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificar o conhecimento prévio dos estudantes sobre as propriedades da matéria e sobre os modelos atômicos;</li> <li>• Inferir sobre os níveis de energia dos átomos após evidenciar as contribuições de Bohr;</li> <li>• Enfatizar os saltos quânticos entre níveis de energia evidenciando a interação entre matéria e luz;</li> <li>• Indicar o comportamento dual da matéria (contribuições de Louis De Broglie);</li> <li>• Interpretar qualitativamente a função de onda;</li> <li>• Indicar e relacionar densidade de probabilidade dos elétrons com os orbitais atômicos;</li> <li>• Discutir o princípio da incerteza (qualitativamente).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificar as concepções prévias dos estudantes sobre os modelos atômicos;</li> <li>• Reproduzir vídeo que explore os modelos atômicos (organizadores prévios para níveis de energia);</li> <li>• Reproduzir vídeos curtos que explorem os níveis atômicos (organizadores prévios para formação de bandas);</li> <li>• Diferenciar os modelos atômicos indicando noções de quantização (órbitas e radiação). Diferenciação progressiva.</li> <li>• Retomar os aspectos mais gerais ao evidenciar os saltos quânticos dos elétrons e liberação energia em forma de luz. Reconciliação integradora – Estabelecer relações com o LED e a fotocélula.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Situação-problema:</b> O que são níveis de Energia; Como os elétrons se distribuem num átomo? (Nível um pouco mais aprofundado); Discussão com os alunos;</li> <li>• Reprodução de um vídeo sobre a evolução dos modelos atômicos – evidenciar as contribuições de Bohr;</li> <li>• Reprodução de vídeos para recuperar a ideia dos níveis atômicos abordados na disciplina de Química.</li> <li>• Aula expositiva para explorar noções do que foi evidenciado dos vídeos: contribuições de Bohr, ondas de partículas, equação de Schrödinger; estado do elétron.</li> </ul>
<b>Semana 04 (Aula 08)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Explicar a Interação e sobreposição dos estados eletrônicos dos elétrons na formação dos sólidos cristalinos;</li> <li>• Apontar a natureza ondulatória dos elétrons nos cristais como característica importante para a formação das bandas de energia;</li> <li>• Mostrar e interpretar graficamente a noção probabilística da solução da equação de Schrödinger – Onde o elétron poderá ser encontrado;</li> <li>• Revelar o desdobramento dos níveis de energia quando há formação do sólido cristalino;</li> <li>• Mostrar que as bandas de energia podem ou não estar preenchidas (ocupadas) por elétrons;</li> <li>• Destacar as bandas de valência e de condução e a faixa proibida (banda de gap). Apontar que esta última banda não é acessível para os elétrons;</li> <li>• Definir o elétron-volt. Associar à faixa proibida;</li> <li>• Mostrar o desdobramento dos níveis a partir do modelo de Kronig-Penney.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Propor novas situações-problema: Ex.: Mas o que deve ocorrer quando muitos átomos são ligados para formar um sólido? (Levando em conta o conhecimento prévio dos estudantes)</li> <li>• Mostrar a superposição das funções de onda dos níveis atômicos a partir de algumas simulações. (Conteúdo menos inclusivo e construção de novas ideias ancoradoras; nível maior de complexidade)</li> <li>• Sublinhar novos subsunçores;</li> <li>• Comparar níveis de energia com bandas de energia (diferenciação progressiva e reconciliação integradora).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Situação-problema:</b> O que são as chamadas Bandas de Energia que possibilitaram os saltos dos elétrons nos materiais semicondutores? Como elas são formadas a partir dos níveis atômicos?</li> <li>• Aula expositiva (Slides): Diante dos conceitos e concepções da Física Quântica abordados na aula anterior, explicar a interação e perturbação dos estados eletrônicos;</li> <li>• Exibição de diversos Recursos Educacionais como imagens, vídeos e simulações;</li> <li>• Discussão em sala de alguns conceitos da Física Quântica – ondas de partícula, noção de probabilidade, interpretação da função de onda, desdobramento dos níveis em bandas de energia, etc.;</li> <li>• Caracterizar o modelo de Kronig-Penney.</li> </ul>

**Quadro 4.** Descrição da UEPS – Semana 04 (Aulas 07 e 08).

O Quadro 4 evidencia o novo direcionamento da UEPS proposto desde a Aula 06. Neste segundo momento, mais conceitos da FMC foram contemplados nas novas situações-problemas. O conteúdo mais geral e inclusivo somente seria retomado na última semana de aulas, após a discussão das contribuições da Física Quântica nos fenômenos.

Vídeos de curta duração, com a função de organizadores prévios, foram inseridos na Aula 07 visando a problematização do átomo e a quantização da matéria. Estes vídeos, encontrados facilmente na internet, exploram a história dos modelos atômicos até as contribuições de Niels Bohr para os níveis de energia no átomo de hidrogênio.

No final de um destes vídeos, o autor apresenta as contribuições de Louis de Broglie e Schrödinger para o modelo atômico moderno. A expressão “ondas de matéria” é apresentada sem maiores explicações, o que contribuiu para a elaboração de uma aula expositiva abordando este aspecto Física Quântica.

Como a ideia central da Aula 08 é a de retomar a problematização da Teoria de Bandas, visando explorar a sua formação a partir da sobreposição das funções de onda dos elétrons, torna-se necessário, primeiramente, discutir a natureza ondulatória dos elétrons.

Os Slides que seguem foram elaborados com esta finalidade, e inseridos na UEPS logo após o início da problematização da Aula 08. Os conteúdos destacados nos slides são: o comportamento dual da luz e da matéria; níveis degenerados de energia para o átomo de hidrogênio – compatibilidade entre as teorias de Bohr e Schrödinger; interação ou sobreposição das funções de onda e desdobramento dos níveis de energia – formação de bandas dos sólidos.

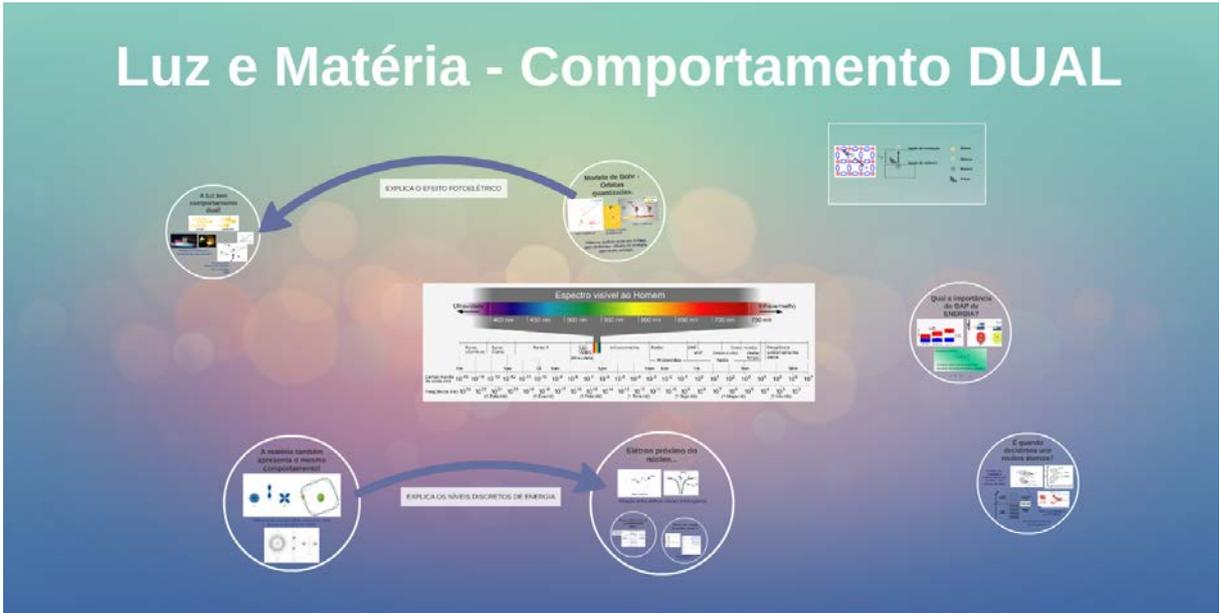


Figura 22. Slides propostos para a Aula 08.

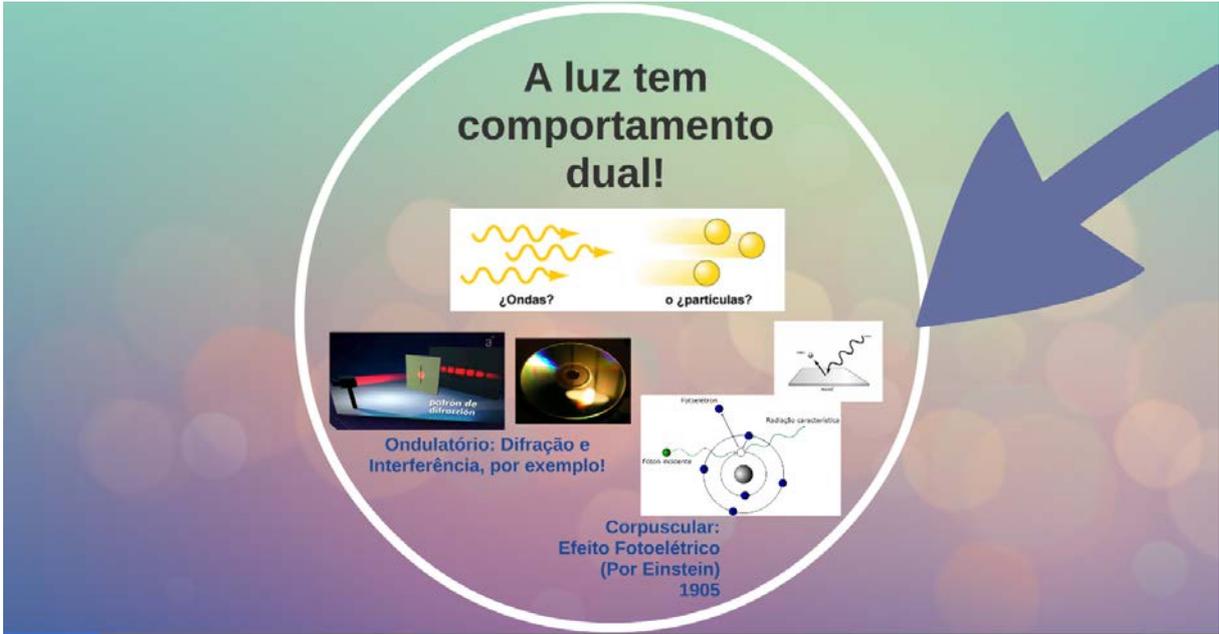


Figura 23. Slide 01 proposto para a Aula 08.

**A matéria também apresenta o mesmo comportamento!**

Elétron pode ser entendido como uma onda  
(Louis de Broglie) em 1924!

EXPI

Figura 24. Slide 02 proposto para a Aula 08.

**Modelo de Bohr - Órbitas quantizadas.**

Elétrons podem estar em órbitas bem definidas - Níveis de energia, subníveis, orbitais

Figura 25. Slide 03 proposto para a Aula 08.

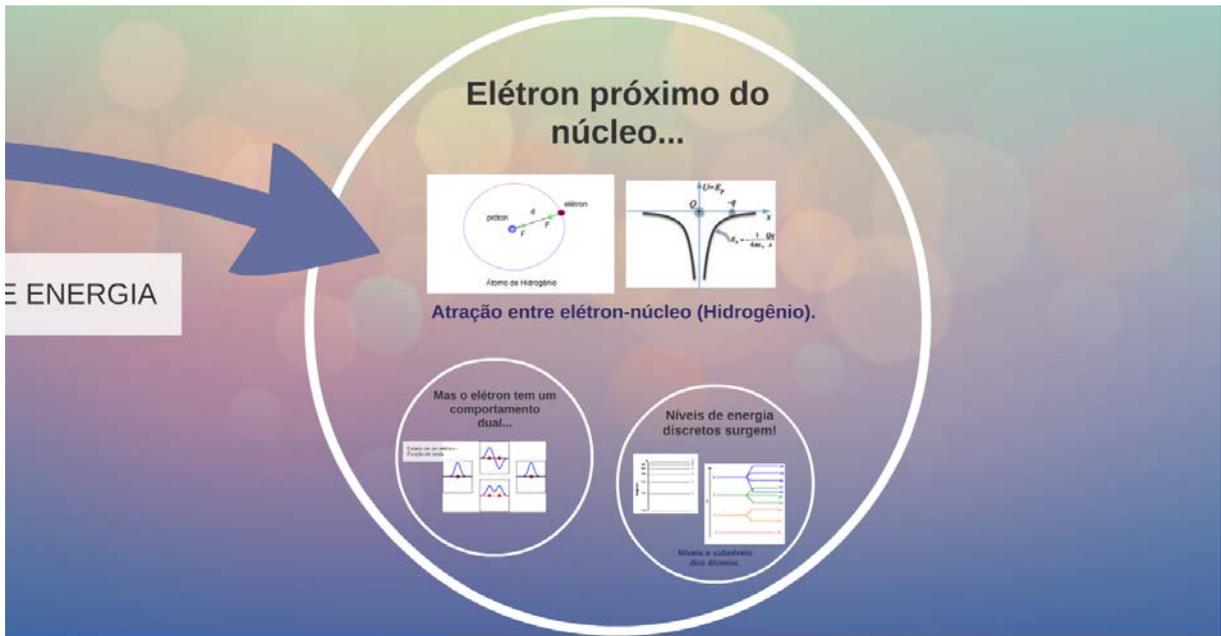


Figura 26. Slide 04 proposto para a Aula 08.



Figura 27. Slide 05 proposto para a Aula 08.

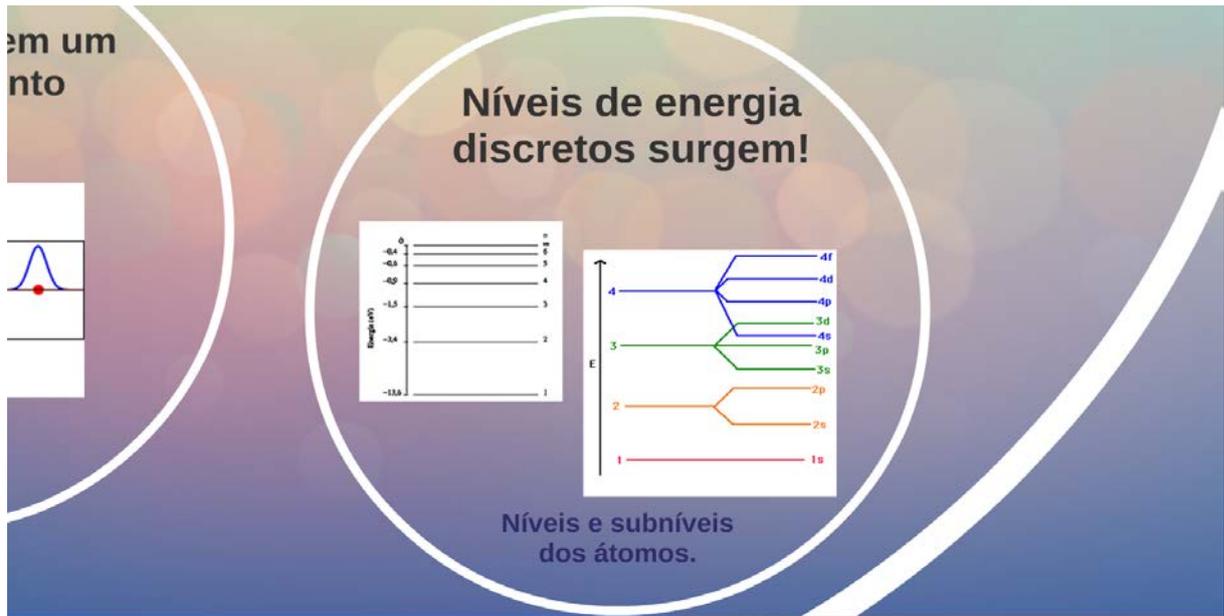


Figura 28. Slide 06 proposto para a Aula 08.

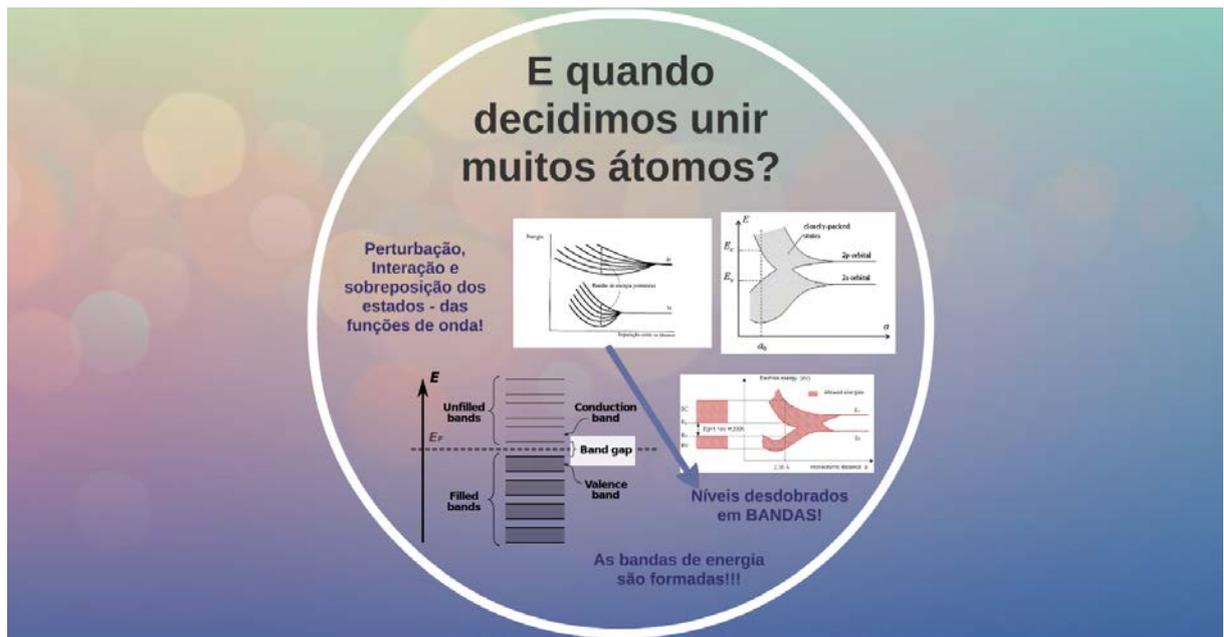


Figura 29. Slide 07 proposto para a Aula 08.

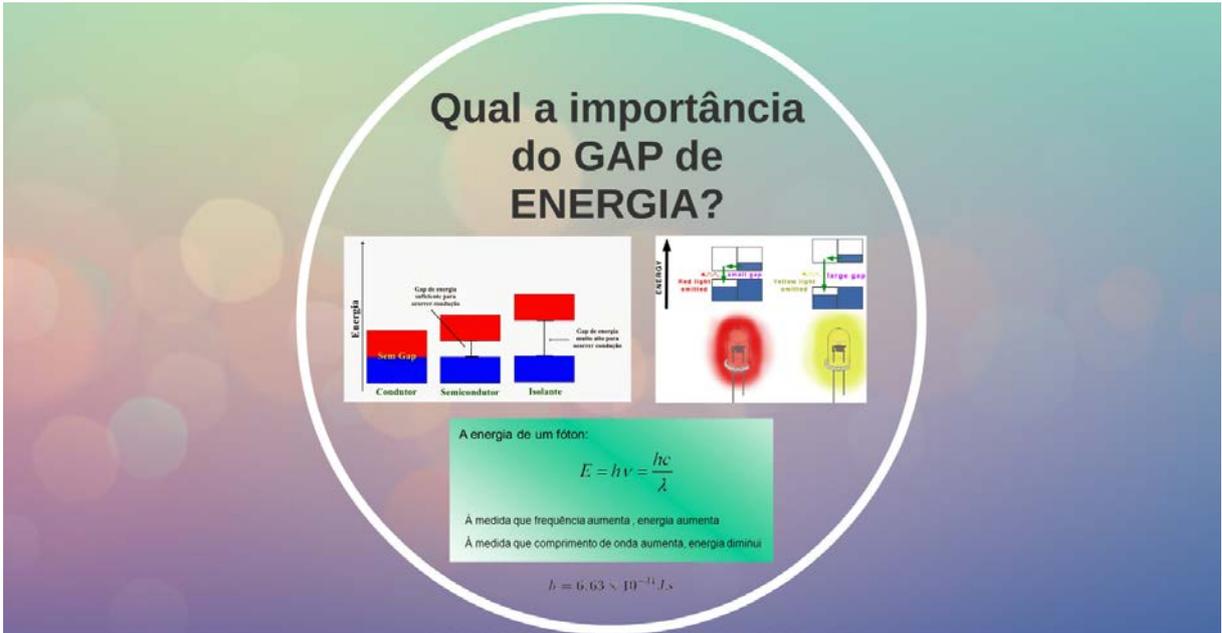


Figura 30. Slide 08 proposto para a Aula 08.

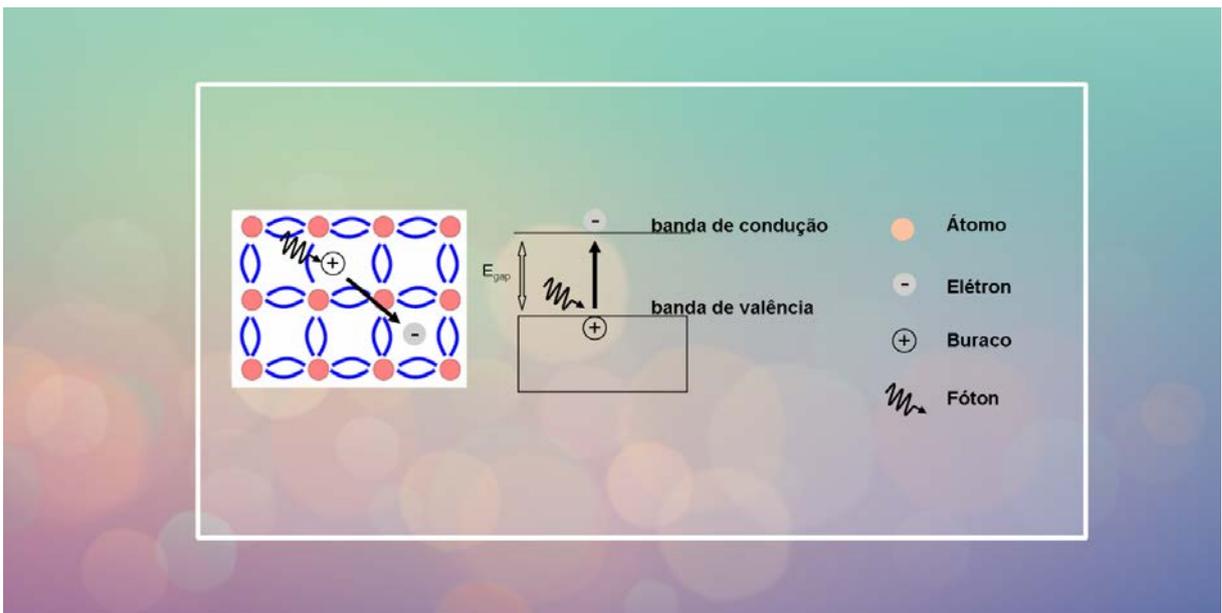


Figura 31. Slide 09 proposto para a Aula 08.

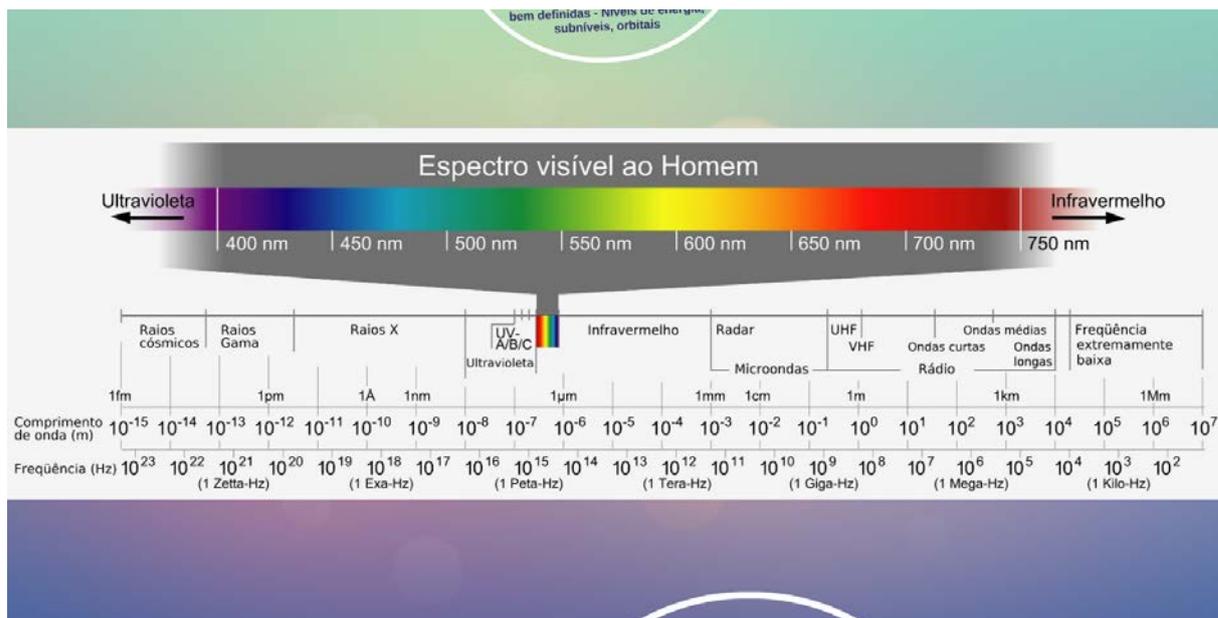


Figura 32. Slide 10 proposto para a Aula 08.

No final da Aula 08 é proposto a utilização de uma simulação com a finalidade de mostrar os níveis degenerados de energia e o desdobramento em bandas com a aproximação de “muitos átomos” na formação do sólido cristalino.

O modelo de Kronig-Penney (MCQUARRIE, 1996), explorado na Seção 2.2.3, é muito utilizado para tratar o problema da formação de bandas num sólido cristalino. O tratamento é baseado na descrição do elétron num potencial periódico unidimensional. É um sistema idealizado, relativamente simples e muito encontrado nos livros de Mecânica Quântica. Em sua descrição, considera-se que a estrutura atômica do sólido é formada por uma rede periódica infinita constituída por barreiras de potenciais retangulares.

A modelagem matemática deste modelo foi utilizada na programação da simulação “Estrutura de Bandas”, por um estudante do curso de Engenharia da Computação da Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS). As imagens que seguem mostram as principais telas da simulação, as quais evidenciam o modelo de Kronig-Penney. Outras imagens podem ser conferidas no Apêndice 05.

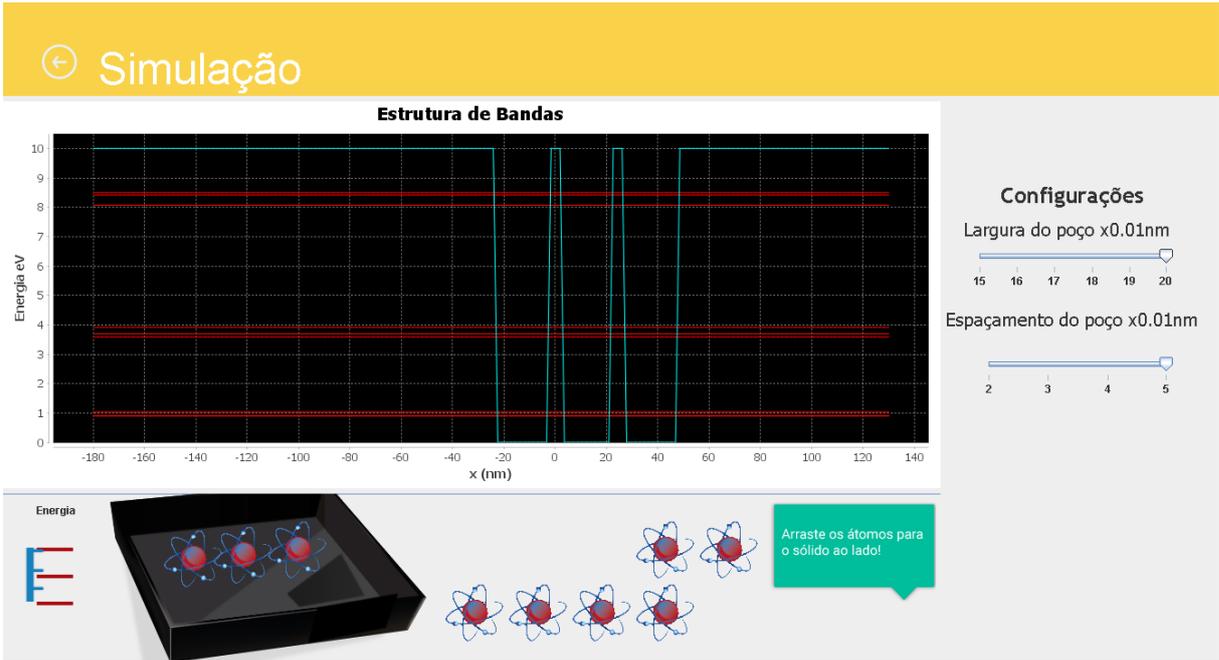


Figura 33. Tela principal da Simulação "Estrutura de Bandas"

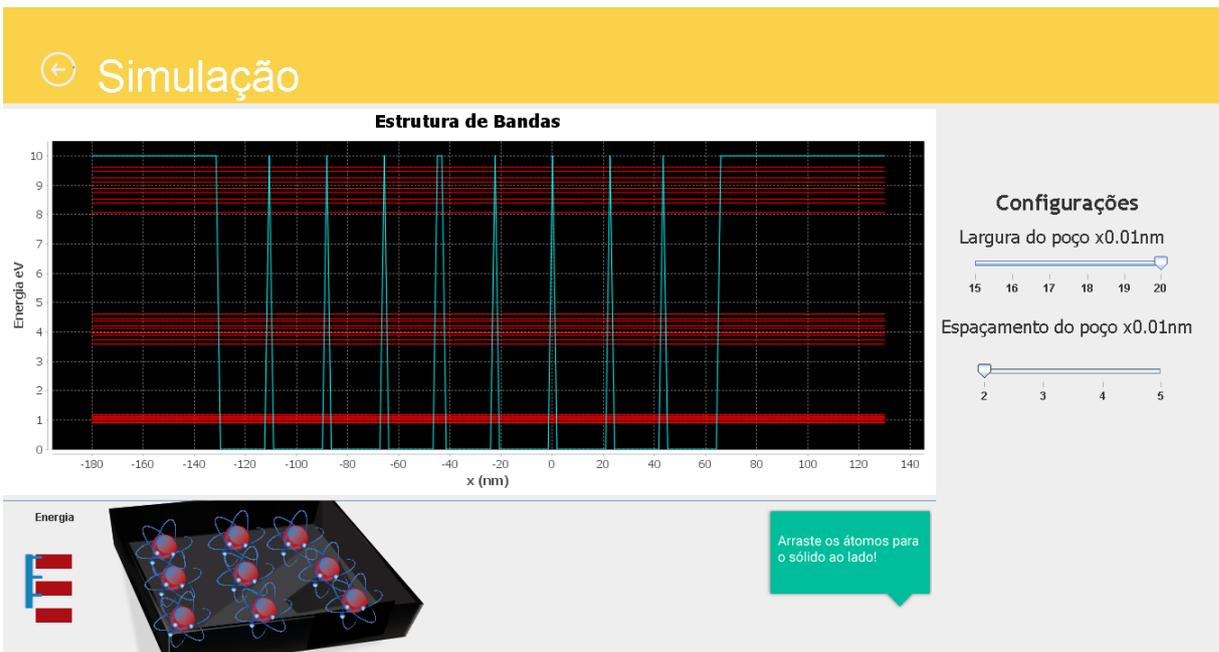


Figura 34. Simulação exibindo o desdobramento em bandas de energia.

A UEPS foi finalizada com a retomada dos aspectos gerais e inclusivos abordados desde as primeiras aulas – o funcionamento dos dispositivos semicondutores (Fotocélula e LEDs):

Semana/Aula	Objetivos principais das aulas (aspectos epistemológicos)	Princípios da Teoria Ausubeliana e aspectos sequenciais	Estratégias didáticas e processos avaliativos.
<b>Semana 05 (Aula 09)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Relacionar a largura da banda de gap com a energia dos fótons emitidos dos LEDs;</li> <li>Relacionar as equações <math>\Delta E = hv</math> e <math>v=c/\lambda</math>;</li> <li>Calcular a energia dos fótons emitidos a partir da largura de Band gap usando a equação <math>\Delta E = hv</math>;</li> <li>Explicar o efeito fotovoltaico e o funcionamento dos LEDs.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Retomar aos saltos quânticos entre bandas de valência e condução buscando descrever o funcionamento dos LEDs e da fotocélula (Reconciliação integradora);</li> <li>Simular saltos quânticos e relacionar com a energia de gap – Realizar cálculos simples para encontrar valores para a energia da banda proibida (Reconciliação integradora);</li> <li>Retomar conceitos e ideias das aulas anteriores através da utilização de uma hiperídia – descrever o Efeito fotovoltaico; Reconciliação integradora.</li> <li>Novas situações-problemas: Como identificar e calcular a cor da luz emitida dos LEDs? (Apresentação de novas situações-problema em níveis mais altos de complexidade)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Situação-problema:</b> Qual a importância da banda proibida (GAP de energia) nos dispositivos semicondutores?</li> <li>Exibição de diversos Recursos Educacionais como imagens, animações e simulações;</li> <li>Resolver algumas questões sobre quantização – LEDs e fotocélula;</li> <li>Retomar aspectos gerais para descrever funcionamento da fotocélula e do LED.</li> </ul>
<b>Semana 05 (Aula 10)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Retomar grande parte dos aspectos e conceitos abordados;</li> <li>Realizar procedimentos avaliativos;</li> <li>Evidenciar Aprendizagem Significativa (AS).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Revisar os diversos conceitos quânticos abordados (retomar os aspectos mais gerais, estruturantes)</li> <li>Realizar alguns procedimentos para evidenciar AS (avaliação da aprendizagem -Registro de tudo que possa ser considerado evidência de aprendizagem significativa do conteúdo trabalhado e captação de significados)</li> <li>Solicitar dos alunos a construção de mapas conceituais (avaliação somativa individual – evidenciar a capacidade de transferência dos alunos).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Questionário 5 – Nível menos inclusivo – Avaliação final.</li> <li>Questionário 6 – Nível menos inclusivo – Avaliação final – somativa – questões de múltipla escolha.</li> <li>Construção de um mapa conceitual – retomar todos os conceitos abordados.</li> <li>Sorteio de um kit “robô solar” para um dos alunos da turma.</li> </ul>

**Quadro 5.** Descrição da UEPS – Semana 05 (Aulas 09 e 10).

Como mostra o Quadro 5, os saltos quânticos foram recuperados com a aplicação de equações em problemas que relacionavam a banda proibida com a energia do fóton emitido (ou absorvido). Esta estratégia tinha como objetivo essencial a Aprendizagem Significativa dos conceitos da Física Quântica através dos processos da reconciliação integradora.

Os recursos educacionais inseridos na Aula 09, como animações e simulações, mostram o funcionamento dos LEDs e da Fotocélula. A utilização destes recursos pode facilitar a diferenciação entre os fenômenos da recombinação e da

geração de pares elétron-buraco e contribuir a assimilação dos tópicos da FMC explorados ao longo da UEPS.

A Aula 10 foi proposta para a revisão geral de alguns conceitos abordados. Além disso, é o momento ideal para buscar indícios da Aprendizagem Significativa a partir de alguns procedimentos avaliativos. Alguns questionários, por exemplo, podem ser aplicados com o intuito de identificar o que foi aprendido. Outra atividade sugerida foi a construção de mapas conceituais para evidenciar a relação dos conceitos assimilados. Esta estratégia pedagógica pode também indicar a hierarquização das ideias estabelecidas na mente dos sujeitos envolvidos na intervenção.

Vale salientar que a UEPS desenvolvida não seria a única proposta possível e muito menos um modelo de sequência didática ideal para ser aplicada em sala de aula. A elaboração da mesma englobou tanto os conhecimentos específicos da Física Moderna, no intuito de gerar as devidas inovações curriculares, quanto o saber docente e o contexto escolar. Estiveram presentes durante todo o processo de design e construção, as concepções prévias dos alunos, a hierarquização dos conteúdos, a preocupação com a Aprendizagem Significativa dos conceitos da Física Quântica e os instrumentos de avaliação e coleta de dados que possibilitasse a futura validação da UEPS.

## 5. APLICAÇÃO DA UEPS E COLETA DOS DADOS

Ao iniciar as aulas, dado que a proposta estava relacionada com uma epistemologia construtivista, a partir dos interesses, expectativas e experiências prévias dos alunos, optamos por mostrar, nos primeiros minutos, alguns dispositivos eletroeletrônicos frequentemente usados para iluminação em residências – lâmpadas incandescentes e lâmpadas fluorescentes – e outros dispositivos mais modernos – diferentes tipos de LEDs. Na mesma aula, um painel fotovoltaico (fotocélula) foi mostrado a partir do “kit solar” – uma espécie de quebra-cabeça estilo “Lego” para montagem de diferentes “robôs solares” que se moviam com a energia elétrica proveniente do pequeno painel fotovoltaico (Ver Apêndice 04).

A problematização contextualizada a partir da apresentação destes dispositivos forneceu os primeiros subsídios para análise futura dos resultados desta pesquisa. Nosso objetivo com a adoção dessa prática era coletar algumas concepções prévias dos estudantes sobre os processos de conversão de energia com a observação e comparação destes dispositivos. As ideias prévias dos estudantes foram coletadas com a aplicação do primeiro questionário – “Questionário 1” (Apêndice 08).

Este instrumento referia-se, principalmente, à geração, transformação e conservação de energia, mas questionava também as concepções sobre a luz, suas formas de produção a partir de alguns dispositivos eletroeletrônicos. Ou seja, problematizava o assunto que seria ensinado com elevado grau de inclusividade de conteúdos – Luz e Energia. Preferimos partir da problematização da luz e energia por acreditar que este é o assunto mais geral e inclusivo da primeira semana de aula. No entanto, o estudo dos semicondutores tornou-se o maior foco nas aulas seguintes.

A problematização dos semicondutores e os desdobramentos dos conceitos e noções da FMC ocorreram após o seguinte questionamento: “*Qual o principal material presente nestes dispositivos mostrados (LED e a fotocélula)?*”. A identificação da presença dos semicondutores nestes dispositivos ocorreu ainda na primeira aula pelos estudantes através de uma rápida pesquisa na internet usando seus *smartphones*. Alguns estudantes destacaram as palavras mais comuns encontradas quando era feita uma simples pesquisa na *web* com a utilização de alguns termos

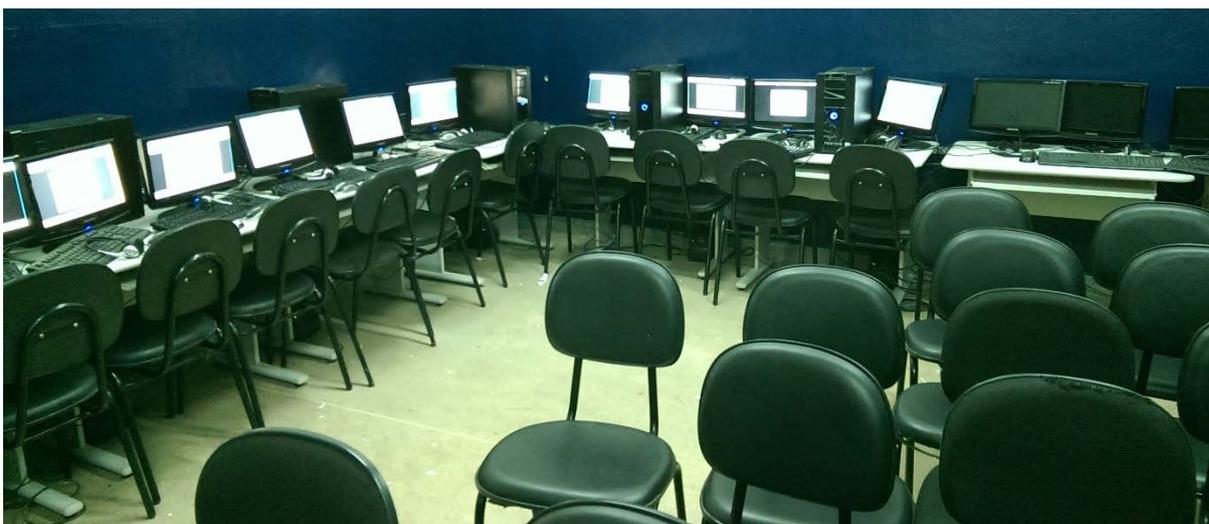
como “material dos painéis solares”; “material dos LEDs” e “material fabricação dispositivos eletrônicos”.

As palavras destacadas pelos estudantes foram compartilhadas em sala de aula com intuito de evidenciar as mais recorrentes na pesquisa. Uma das mais destacadas foi “semicondutores” e nenhum estudante soube discorrer sobre suas essenciais características.

Após a identificação do principal material presente nos dispositivos mostrados, os alunos puderam, em duplas, interagir com a Hipermídia<sup>11</sup> “Semicondutores”, a fim de coletar algumas características dos semicondutores e solucionar o “Questionário 2” (Apêndice 09), durante a segunda aula da UEPS, como mostra o Quadro 1. O objetivo deste questionário foi de fixar, na estrutura cognitiva dos estudantes, os conceitos básicos dos semicondutores.

Treze computadores foram configurados para rodar a Hipermídia. Devido à pouca utilização dos computadores por professores e alunos na sala de informática, o professor necessitou se deslocar à escola um dia antes da aplicação da hipermídia para organizar a sala e reparar alguns computadores que apresentavam problemas de sistema e de hardware.

A figura que segue mostra parte dos computadores reparados após à visita prévia.



**Figura 35.** Computadores reparados executando a Hipermídia “Semicondutores”.

---

<sup>11</sup> Disponibilizada gratuitamente na internet em: <http://objetoseducacionais2.mec.gov.br/handle/mec/14345>

A Figura 36 mostra um momento em que os envolvidos na pesquisa assistiram à esta hipermissão em outro momento da UEPS, com o intuito de revisar alguns conceitos.



**Figura 36.** Exibição da Hipermissão “semicondutores”.

Outros 4 (quatro) questionários também foram explorados. O “Questionário 3” (Apêndice 11), aplicado na terceira aula, problematizava as conversões de energia de dois experimentos construídos pelos alunos em sala durante a Aula 03.

Estudantes que optaram pelo primeiro experimento tiveram que responder, em grupo, as questões pertinentes do “Questionário 3”. O outro grupo que ficou responsável por construir o segundo experimento responderam às questões relacionadas ao experimento da “simples fotocélula”.

Antes de explorar alguns conceitos da FMC, ou mais precisamente na Aula 05, os alunos tiveram que responder ao questionário menos inclusivo – “Questionário 4” (Apêndice 12) – e, posteriormente, construir o primeiro mapa conceitual. Tanto o Questionário 4 quanto o mapa conceitual buscavam identificar a Aprendizagem Significativa de conceitos e teorias explorados até a Aula 05, partindo de uma abordagem introdutória e até então investigativa.

Concepções básicas sobre semicondutores, condução de eletricidade nos sólidos, ligações químicas e estrutura cristalina, dopagem e movimento de portadores

de cargas entre bandas de energias, até então poderiam ser destacadas pelos estudantes em ambos os instrumentos de coleta de dados (Questionário 4 e primeira versão do mapa conceitual).

Estes instrumentos de coleta foram usados também em outro momento da intervenção. Na Aula 10, os estudantes tiveram que responder ao mesmo questionário – nomeado desta vez por “Questionário 5” (Apêndice 13). No mesmo dia, os estudantes tentaram elaborar o último mapa conceitual, desta vez considerando as especificidades do conteúdo. Ou seja, mais concepções sobre a FMC poderiam ser elencadas pelos estudantes na realização destes trabalhos.

Vale destacar que o objetivo em aplicar o mesmo questionário (4 e 5) com baixo grau de inclusividade, em distintos momentos, foi de identificar e comparar as ideias dos estudantes antes e após os processos de diferenciação progressiva e reconciliação integradora dos conceitos que seriam abordados.

Ainda durante a aula 10, os estudantes tiveram que responder ao último questionário – “Questionário 6” (Apêndice 14). Destacamos, também, que na última semana de aulas foi disponibilizado um horário de um outro professor da instituição para que os alunos pudessem dispor de mais tempo para responder aos Questionários 5 e 6, e elaborar a última versão do mapa conceitual.

## **5.1 Tabulação de dados**

Preferimos inicialmente tabular<sup>12</sup> os dados obtidos das respostas do Questionário 6 para identificar os estudantes que acertaram o maior número de questões e, provavelmente, assimilaram a maior parte dos conceitos abordados na UEPS e aqueles que tiveram certas dificuldades de compreensão. Ou seja, a tabulação destes dados será usada como referência para análise correlacionada deste e outros instrumentos de coleta de dados usados durante a aplicação da proposta didática.

O Quadro 6 expõe o desempenho de cada estudante a partir do número de acertos de cada questão explorada no Questionário 6. Para facilitar a posterior análise dos dados, optamos por organizá-la por nota geral. Usamos “E” para identificar as

---

<sup>12</sup> É a padronização e codificação das respostas obtidas através dos instrumentos de coleta de dados. É a maneira ordenada de dispor os resultados numéricos para facilitar a leitura e análise.

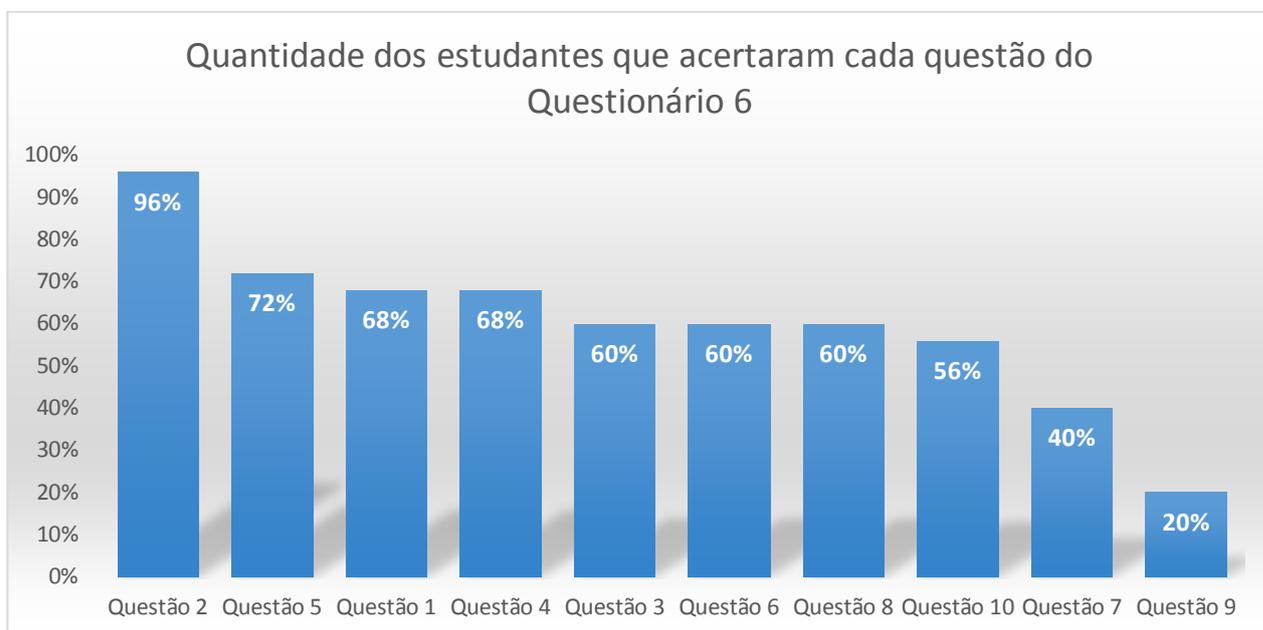
questões respondidas incorretamente e “C” para as questões respondidas corretamente, assim como, usamos “sim” para identificar os estudantes que se dedicaram à resolução do cálculo da Questão 09:

	Q 1	Q 2	Q 3	Q 4	Q 5	Q 6	Q 7	Q 8	Q 9	Q 9 (CÁLCULO)	Q 10	Total de Acertos
ESTUDANTE 01	C	C	C	C	C	C	C	C	E	SIM	C	9
ESTUDANTE 02	C	C	C	C	C	C	E	C	C	SIM	C	9
ESTUDANTE 17	C	C	C	C	C	C	C	C	E	NÃO	C	9
ESTUDANTE 31	C	C	C	C	C	C	C	C	E	NÃO	C	9
ESTUDANTE 19	C	C	E	C	C	C	E	C	C	SIM	C	8
ESTUDANTE 22	C	C	C	C	C	E	C	C	E	NÃO	C	8
ESTUDANTE 27	C	C	C	C	C	C	C	C	E	NÃO	E	8
ESTUDANTE 07	C	C	E	C	C	C	C	C	E	NÃO	E	7
ESTUDANTE 11	E	C	C	C	E	C	C	E	C	SIM	C	7
ESTUDANTE 13	C	C	C	C	C	C	E	C	E	NÃO	E	7
ESTUDANTE 18	C	C	E	C	C	E	C	C	E	NÃO	C	7
ESTUDANTE 25	C	C	C	C	C	C	E	C	E	NÃO	E	7
ESTUDANTE 12	E	C	E	C	C	C	E	E	C	SIM	C	6
ESTUDANTE 23	E	C	E	C	C	C	E	C	E	NÃO	C	6
ESTUDANTE 30	E	C	E	C	C	C	C	C	E	NÃO	E	6
ESTUDANTE 05	C	C	C	E	C	E	E	E	E	NÃO	C	5
ESTUDANTE 03	C	C	C	E	E	C	E	E	E	NÃO	E	4
ESTUDANTE 04	C	C	C	C	E	E	E	E	E	NÃO	E	4
ESTUDANTE 14	C	E	C	E	E	E	E	C	E	NÃO	C	4
ESTUDANTE 24	E	C	E	E	E	E	C	C	E	NÃO	C	4
ESTUDANTE 26	E	C	E	C	C	C	E	E	E	NÃO	E	4
ESTUDANTE 09	E	C	E	E	C	E	E	E	E	NÃO	C	3
ESTUDANTE 10	C	C	C	E	E	E	E	E	E	NÃO	E	3
ESTUDANTE 28	E	C	E	E	C	E	E	E	C	SIM	E	3
ESTUDANTE 29	C	C	C	E	E	E	E	E	E	NÃO	E	3
ESTUDANTE 06	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
ESTUDANTE 08	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
ESTUDANTE 15	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
ESTUDANTE 16	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
ESTUDANTE 20	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
ESTUDANTE 21	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

**Quadro 6.** Desempenho dos estudantes referente ao Questionário 6.  
Elaboração: CAMPOS, Gustavo de Carvalho (2015)

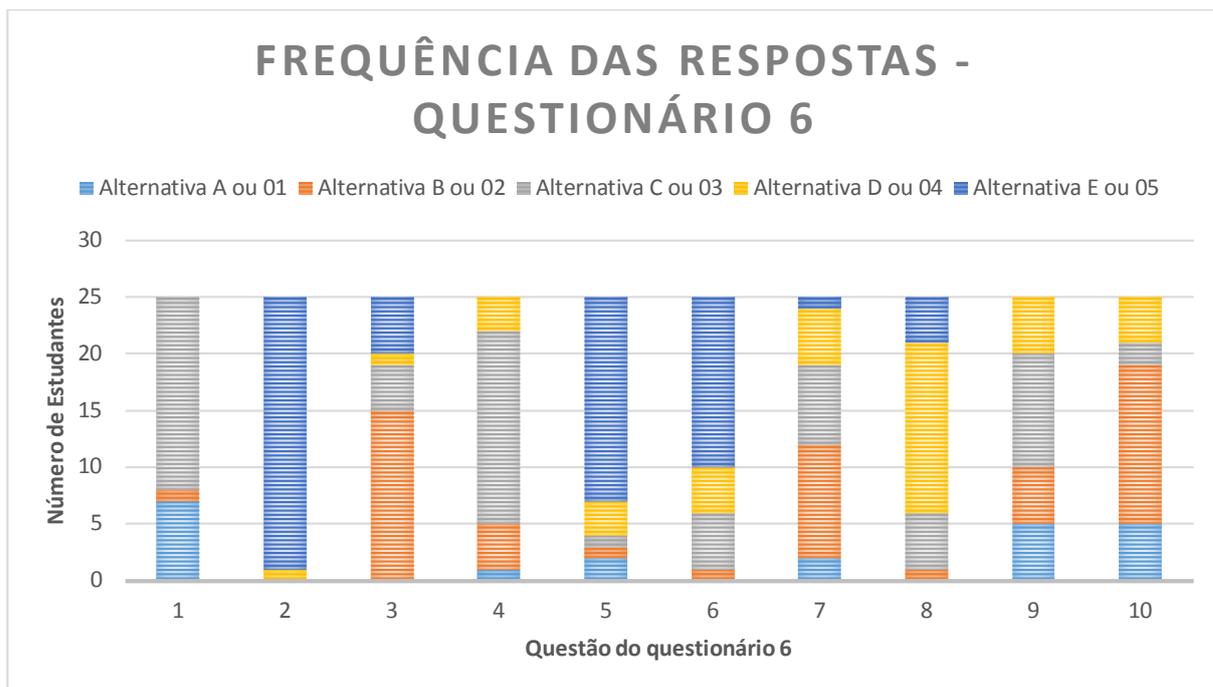
Esse quadro também pode nos dar indícios das questões mais compreendidas e/ou assimiladas pelos estudantes durante a abordagem do conteúdo. Para facilitar a análise, buscamos elaborar um gráfico (Gráfico 1), identificando o

percentual de acertos por questão, tendo como base o número total dos estudantes que responderam ao referido questionário.



**Gráfico 1.** Percentual de estudantes que acertaram cada questão.  
Elaboração: CAMPOS, Gustavo de Carvalho (2015)

Além disso, identificamos as alternativas mais marcadas pelos estudantes em cada questão do mesmo questionário. Estas informações podem evidenciar prováveis desafios de aprendizagem encontrados ao longo do processo de intervenção da proposta. O gráfico a seguir revela estas informações:



**Gráfico 2.** Frequência das respostas por questão.  
Elaboração: CAMPOS, Gustavo de Carvalho (2015)

É imprescindível aqui destacar que alguns dos estudantes voluntários da pesquisa deixaram de participar de algumas aulas e/ou de alguns processos avaliativos principalmente por dificuldades em permanecer até o final das aulas ou por dificuldades de deslocamento até à escola. Os estudantes que não responderam ao último questionário (Questionário 6), seja por estas ou outras dificuldades, ou por simplesmente não estarem dispostos em solucioná-lo, são facilmente identificados no Quadro 6. Assim, dos 31 estudantes que participaram da pesquisa, temos um total de 25 que responderam a este questionário.

Preferimos também identificar os estudantes que responderam a outros questionários e que construíram a primeira e a segunda “versão” do mapa conceitual. O quadro que segue mostra a participação geral dos mesmos em todas as etapas avaliativas realizadas individualmente. Identificamos pela cor verde àqueles que participaram de cada etapa e pela cor cinza, os que não participaram de determinadas etapas.

	QUEST. 01	QUEST. 02	QUEST. 04	QUEST. 05	QUEST. 06	Mapa (V.1)	Mapa (V.2)
ESTUDANTE 01							
ESTUDANTE 03							
ESTUDANTE 05							
ESTUDANTE 07							
ESTUDANTE 11							
ESTUDANTE 12							
ESTUDANTE 13							
ESTUDANTE 17							
ESTUDANTE 18							
ESTUDANTE 19							
ESTUDANTE 22							
ESTUDANTE 23							
ESTUDANTE 24							
ESTUDANTE 25							
ESTUDANTE 26							
ESTUDANTE 30							
ESTUDANTE 31							
ESTUDANTE 04							
ESTUDANTE 09							
ESTUDANTE 28							
ESTUDANTE 29							
ESTUDANTE 02							
ESTUDANTE 06							
ESTUDANTE 10							
ESTUDANTE 16							
ESTUDANTE 20							
ESTUDANTE 27							
ESTUDANTE 14							
ESTUDANTE 15							
ESTUDANTE 21							
ESTUDANTE 08							

**Quadro 7.** Participação voluntária de cada estudante ao longo da UEPS.  
Elaboração: CAMPOS, Gustavo de Carvalho (2015)

Apenas as atividades feitas individualmente foram destacadas no quadro. O Questionário 3 foi respondido por cada grupo envolvido na atividade colaborativa da Aula 03. Os estudantes preferiram ocupar parte do tempo para montar os experimentos e discutir os fenômenos observados. Por este e outros motivos, alguns deixaram de responder este questionário, tornando-se relevante a omissão dessas informações no quadro.

No que diz respeito aos mapas conceituais, algumas versões não foram entregues pelos estudantes. Vários destes não conseguiram elaborar a última versão do mapa, por exemplo, por considerar o tempo insuficiente para sua construção. Entretanto, vale salientar que, nesse dia, a aula iniciou-se antes mesmo do horário proposto devido à ausência de um professor de outra disciplina.

Outros estudantes que não elaboraram os mapas tiveram que sair mais cedo da aula, enquanto alguns preferiram ficar até mesmo depois do horário disponibilizado, para finalizar as atividades avaliativas propostas. Além disso, enquanto alguns estudantes se dedicaram à elaboração da última versão do mapa conceitual, muitos preferiram responder aos questionários.

A análise de dados seria feita com o auxílio das informações dos dados tabulados até então. Entretanto, preferimos correlacionar os resultados obtidos do Questionário 6 com o nível de elaboração (evolução temporal) dos mapas conceituais construídos. Para facilitar a posterior análise dos dados, a partir desta correlação entre os diferentes instrumentos de coleta, optamos por criar uma escala para “qualificar” os mapas conceituais quanto à presença dos seguintes aspectos:

- *Hierarquização dos conceitos* apresentados – Conceitos mais gerais e inclusivos no topo dos mapas – e relação entre os conceitos com a inserção de palavras conectoras (indícios de diferenciação progressiva e reconciliação integrativa defendidos por Ausubel);
- *Inserção de conceitos da FMC* apresentados, tais como: fótons e quantização; níveis, bandas e gap; dualidade; princípio da incerteza; Recombinação, saltos quânticos e formação elétron-buraco; e
- *Pertinência de outros conceitos* destacados pelos estudantes. Isto é, conceitos que não possuíam relação direta com o assunto abordado.

O termo “qualificação” está relacionado com os aspectos estruturais do processo de construção de mapas conceituais (hierarquização e relação entre as ideias/conceitos) e a pertinência da inserção dos conteúdos gerais, relacionados com a temática, e dos conteúdos abordados ao longo da intervenção, isto é, conceitos da FMC.

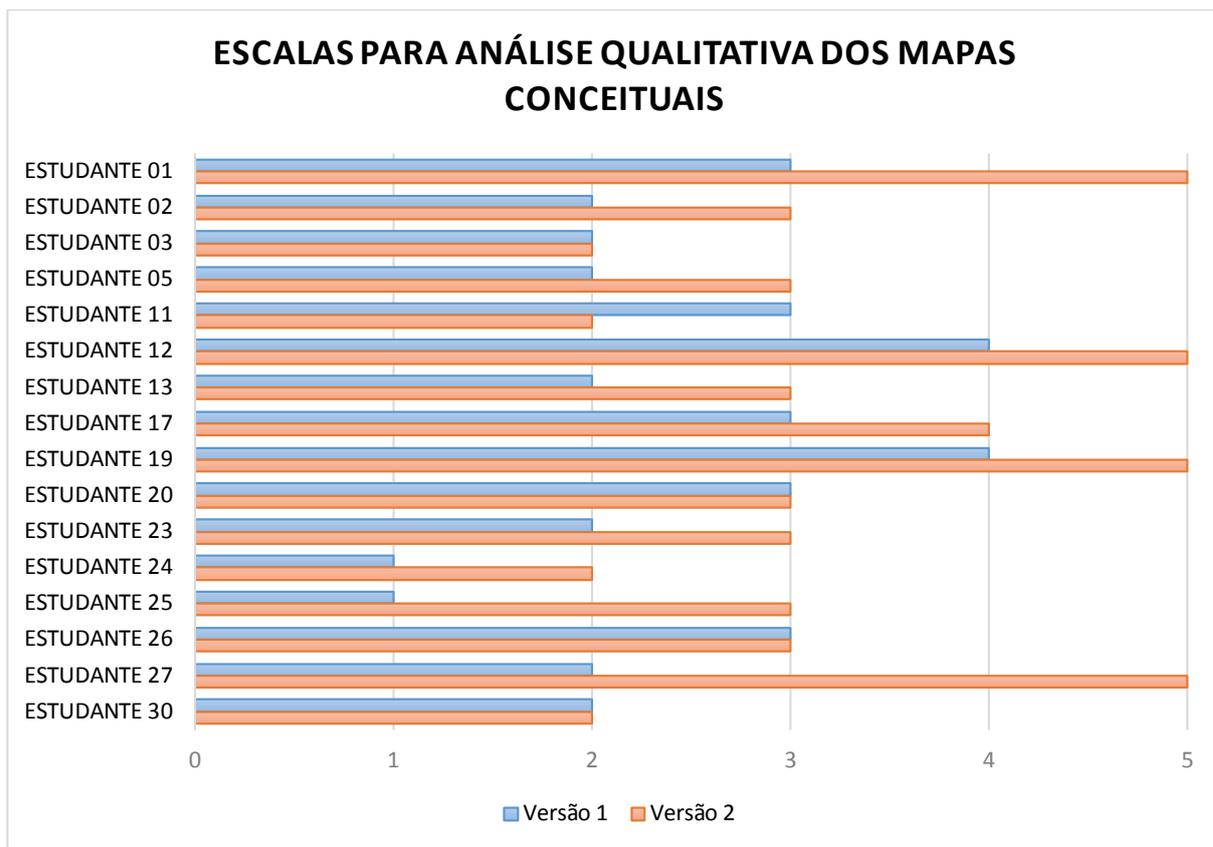
Neste sentido, as escalas criadas, tendo como base os três parâmetros supracitados, não tinham a finalidade de julgar os mapas conceituais elaborados pelos estudantes como certo ou errado e sim, qualificá-los quanto à sua estrutura e aos indicativos da construção e organização do conhecimento na estrutura cognitiva dos estudantes. Estes indicativos ou pistas serão evidenciados, posteriormente, com a apreciação dos aspectos da teoria ausubeliana.

Com a utilização destes parâmetros de análise, qualificamos apenas os mapas daqueles estudantes que entregaram as duas versões solicitadas – uma após a Aula 05 (versão 1) e outra na etapa final da aplicação da UEPS (versão 2). Como a UEPS criada possuiu dois momentos distintos – um antes da inserção de alguns termos inerentes à FMC (antes da Aula 06) e outro após o estudo de conceitos da FMC – optamos por avaliar a evolução dos mapas conceituais (no sentido temporal – i.e., ao longo da intervenção da UEPS). Optamos por não qualificar os mapas dos estudantes que fizeram apenas uma das versões solicitadas.

Atribuímos escalas<sup>13</sup> de 0 (muito insuficiente) a 5 (muito bem elaborado) para avaliar cada aspecto supracitado visando obter uma média geral dos mapas construídos pelos estudantes. A média geral de cada versão de mapa construída por cada estudante pode ser observada no Gráfico 3:

---

<sup>13</sup> Baseado na escala Likert: tipo de escala de resposta psicométrica usada habitualmente em questionários para conhecer o grau de conformidade do entrevistado com qualquer afirmação proposta.



**Gráfico 3.** Escalas para análise qualitativa das versões de mapas conceitual construídas pelos estudantes, com base nos três aspectos estabelecidos.  
Elaboração: CAMPOS, Gustavo de Carvalho (2015)

Acreditamos que, a partir da criação destas escalas, haja uma facilidade na análise qualitativa das ideias presentes nos mapas conceituais de forma correlacionada com os dados obtidos dos outros questionários. Vale destacar que a análise destas escalas pode nos fornecer subsídios para avaliação da Aprendizagem Significativa e a incorporação de significados para conceitos abordados ao longo da aplicação da UEPS.

## 5.2 Procedimentos de Análise dos dados

Em nossa pesquisa, a manipulação dos dados foi feita a partir de dois instrumentos de obtenção de dados: Questionário 6 e duas versões de mapas conceituais construídas pelos alunos. Após atribuição de uma nota para o desempenho dos estudantes no Questionário 6 (Quadro 6) e com a construção de escalas para os mapas conceituais (Gráfico 3), pudemos fazer uma análise mais

objetiva da estruturação dos conceitos e ideias. As escalas e médias atribuídas foram usadas como referências para análise correlacionada dos outros questionários.

A análise (temporal) dos mapas foi pautada nos dois momentos da UEPS: um refere-se à sequência de aulas que antecedeu no momento em que houve uma maior inserção de tópicos da FMC (Aulas 01 a 05) e outro momento onde alguns dos conceitos da Física Quântica foram abordados a partir do fenômeno do Efeito Fotovoltaico e do funcionamento dos LEDs (Aulas 06 a 10). A Figura 21, presente no Capítulo 4 mostra a transição entre estes dois momentos.

Como vimos, as médias atribuídas aos mapas conceituais levaram em conta três aspectos<sup>14</sup>, os quais poderiam indicar melhoria na segunda versão dos mapas, quando comparadas com a primeira versão. Isto é, após o segundo momento da intervenção em sala de aula, esperamos uma maior apropriação de conceitos da FMC pelos estudantes e, portanto, as duas médias obtidas (uma para cada versão de mapa) poderiam indicar a evolução (temporal) da primeira versão e a Aprendizagem Significativa dos conceitos.

A primeira versão dos mapas construídos pelos estudantes deveria considerar poucos conceitos da Física Quântica. Os assuntos abordados até o momento de sua construção estavam mais relacionados com as características dos materiais semicondutores e o funcionamento dos LEDs e da fotocélula. Ou seja, conceitos básicos dos semicondutores, sua estrutura atômica e ligações dos átomos (de silício), dopagem e junção PN deveriam ser destacados pelos estudantes nesta primeira versão. Apenas a ideia geral da quantização (e de fóton), bandas de energia e os saltos quânticos foram sinalizados pelo professor até a Aula 05 e, portanto, embora estas ideias pudessem constar nestes mapas, não indicariam, necessariamente, assimilação desses conceitos pelos estudantes.

Os tópicos da FMC, ou mais precisamente, os conceitos de quantização (Planck e Einstein), saltos quânticos, formação de bandas, dualidade, onda de matéria, e Princípio da Incerteza, somente deveriam ser considerados pelos estudantes na construção da segunda versão dos mapas conceituais por terem sido estudados ou relatados na segunda parte da UEPS. O processo de construção e

---

<sup>14</sup> Cabe aqui lembrar que a nota considerava basicamente a média dos três aspectos dos mapas: hierarquização das ideias, inserção dos conceitos da FMC e a pertinência na inserção de outros conceitos.

evolução desses mapas podem indicar a assimilação destes e outros conceitos da Física Moderna quando se leva em conta a hierarquização e organização das ideias contidas nos mapas.

Iniciamos a análise correlacionada dos mapas e questionários, considerando os estudantes que elaboraram as duas versões dos mapas conceituais (Quadro 7). Esta primeira análise será feita a partir do Gráfico 3, onde foram atribuídas médias para as duas versões de mapas conceituais de cada estudante.

Comparando estas médias, pudemos agrupar os estudantes quanto à evolução de seus mapas conceituais ao longo do processo, com base nos principais aspectos da teoria Ausubeliana como a diferenciação progressiva e a reconciliação integrativa dos conceitos abordados. Focamos, então, na hierarquização dos conceitos apresentados pelos alunos visando obter indícios desses processos.

Os dados coletados do Questionário 6 e estruturados no Quadro 6, por exemplo, podem nos indicar os estudantes que mais assimilaram conceitos e, possivelmente, aprenderam significativamente alguns tópicos da FMC, assim como os próprios fenômenos abordados a partir dos dispositivos semicondutores mostrados desde a primeira aula.

Mas somente a análise da evolução temporal dos mapas conceituais e as respostas do Questionário 5 nos forneceram maiores indícios da AS. Esta discussão será feita no próximo capítulo, correlacionando, também, as respostas dos outros questionários.

Por fim, identificaremos os conceitos que, provavelmente, foram mais compreendidos pelos estudantes a partir das questões mais acertadas.

## 6. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo será feita a análise e discussão dos resultados com base nos critérios de análise preestabelecidos na seção 3.4.6.2.

### 6.1 Aprendizagem: Desafios da aplicação da UEPS

Dentre os mapas da primeira versão, que foram tiveram as menores médias (baixas notas nos três aspectos apreciados), podemos destacar os mapas dos Estudantes 03, 11, 24 e 30. As novas versões elaboradas apresentaram poucos indícios para a Aprendizagem Significativa das teorias modernas. Estes estudantes demonstraram muita insegurança na inserção dos termos da Física Quântica. Os poucos conceitos apresentados não foram relacionados satisfatoriamente com os fenômenos abordados. Isso pode ter comprometido diretamente o processo de hierarquização das ideias durante a elaboração dos mapas conceituais.

A análise correlacionada com o Quadro 6 também nos indica que, dos estudantes que construíram as duas versões de mapas, os que apresentaram dificuldades na elaboração dos mapas também possuíram baixo desempenho no Questionário 6.

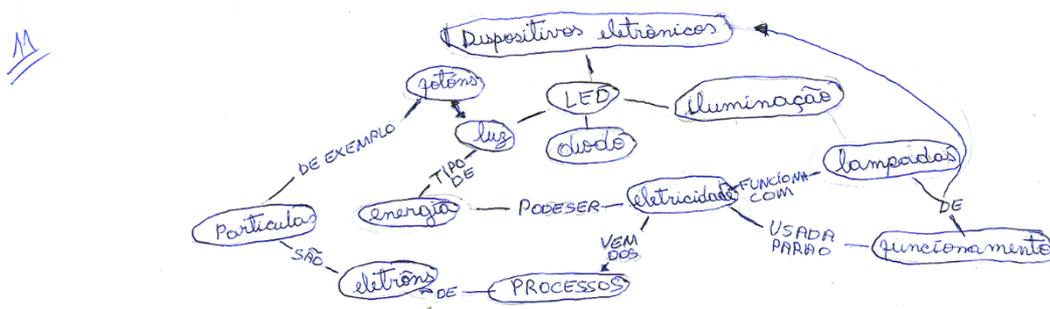
As respostas dos Questionários 4 e 5 dos Estudantes 03, 24 e 30 revelaram deficiências na assimilação de alguns conceitos da FMC, principalmente no que se refere ao desdobramento das bandas de energia e o movimento dos portadores de carga nos semicondutores. Verificando algumas respostas, identificamos inconsistências nas ideias em questões como a 04 e a 08. O Estudante 03, por exemplo, que preferiu deixar em branco a Questão 03 do Questionário 4, passou a responder à questão em poucas palavras: *“os níveis de elétron se torna bandas”*. Não muito diferente, o Estudante 24 preferiu responder à questão, também no segundo momento. Se referiu às bandas, escrevendo: *“cria mais locais possíveis para o elétron estar”*. Embora estas afirmações não estejam incorretas, os estudantes citados e o Estudante 30 não conseguiram explicar a formação de bandas.

Além disso, estes mesmos estudantes não responderam corretamente a questões mais simples como a 01 e a 06, até mesmo no Questionário 5, indicando pouca assimilação dos conceitos abordados.

Em contrapartida, percebemos que o Estudante 11 conseguiu responder satisfatoriamente a algumas questões destes questionários. Logo no Questionário 4, por exemplo, ele conseguiu levantar uma importante hipótese para justificar a formação de bandas nos sólidos antes mesmo que este fenômeno tivesse sido trabalhado em sala com maior propriedade, afirmando: “*Eu acho que é pelo aumento de número de elétrons.*”

Este questionário foi respondido completamente pelo estudante indicando apropriação das ideias abordadas nas aulas desde o primeiro momento. Destacamos, por exemplo, a AS do conceito de buraco e do movimento dos portadores de cargas assim como da diferenciação entre os conceitos de bandas e níveis. Segundo o estudante, os buracos “*são espaços deixados por elétrons que vão ocupar outros buracos que se ocasionaram por meio da dopagem*”; e o movimento dos portadores de cargas “*pode ser entendido [do exemplo] de uma fila de merenda [escolar]: quando alguém dá um passo à frente, deixa um espaço e a pessoa de traz tende a ocupar, o mesmo ocorre com os elétrons*”; “*Bandas são agrupamento dos níveis de energia (...)* os níveis são discretizados”; “*são mais possíveis encontrar elétrons nas bandas [de energia]*”.

Mesmo obtendo bom desempenho em algumas questões dos Questionários 4 e 5, e tendo ainda boa nota no Questionário 6, observou-se que o Estudante 11 enfrentou problemas na construção e desenvolvimento de seus mapas. As Figuras 37 e 38 comprovam como os mapas conceituais apresentaram poucos conceitos explorados nas aulas.



**Figura 37.** Primeira versão de mapa conceitual elaborada pelo Estudante 11.

Nesta versão, podemos inferir que o processo de hierarquização dos conceitos foi comprometido, principalmente pela ausência de palavras de conexão

entre os conceitos mais amplos (como “dispositivos eletrônicos” e “LED”) e conceitos mais específicos da FMC, como “fótons” e “processos”. Ou seja, o estudante inseriu alguns termos já esperados (abordados no primeiro momento da UEPS), mas não estabeleceu relações com os fenômenos físicos que explicariam o funcionamento dos dispositivos eletrônicos.

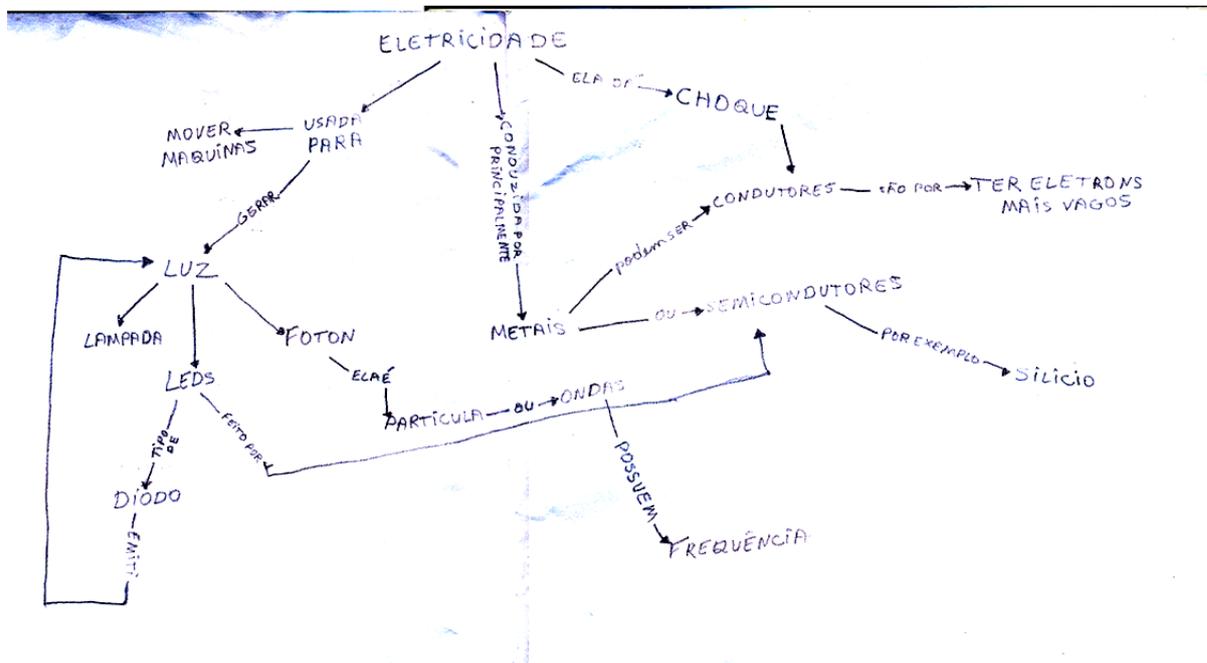
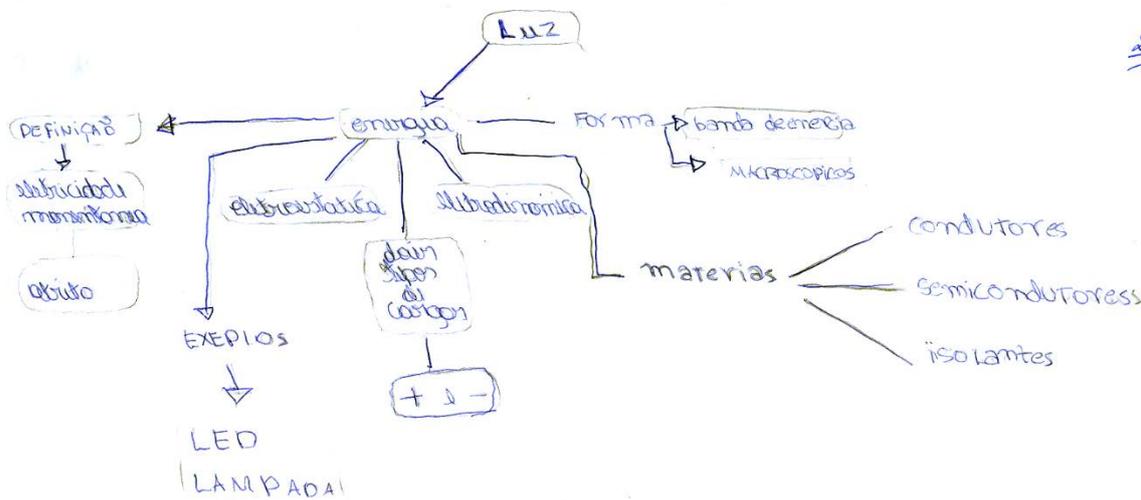


Figura 38. Segunda versão de mapa conceitual elaborada pelo Estudante 11.

Não muito diferente da primeira versão, mas desta vez com a inserção de mais termos da FMC, o Estudante 11 não conseguiu estabelecer relações entre os conceitos da FQ com os fenômenos de recombinação de geração de pares elétron-buraco. Com isso, esta versão apresentou problemas no processo de hierarquização das ideias. Quando comparamos com a hierarquização e relação das ideias contidas na Figura 37, identificamos dificuldades de aprendizagem provenientes dos impasses no processo de diferenciação progressiva. O Estudante 11 pode não ter conseguido compreender satisfatoriamente os fenômenos quânticos de cada dispositivo eletrônico (LED e a fotocélula).

Dois dos mapas conceituais com as menores médias na versão 1 merecem destaque por apresentar maior evolução temporal ao longo do processo. Os Estudantes 25 e 27 conseguiram construir novas versões com melhorias significativas tanto na inserção dos termos da FMC como no processo de hierarquização dos

conceitos e teorias. As figuras 39 e 40 mostram, por exemplo, a evolução de um desses mapas (mapa do Estudante 25).



**Figura 39.** Primeira versão de mapa conceitual elaborada pelo Estudante 25.

A primeira versão apresentada acima revela grande dificuldade em articular as ideias e hierarquizar conceitos abordados em sala de aula. O Estudante 25, embora tivesse considerado “Energia” a palavra mais inclusiva, não conseguiu relacioná-la com os conceitos da FMC esperados e com os da física dos semicondutores. Dopagem, diferenciação dos diferentes tipos de materiais sólidos quanto à condução e os fenômenos de recombinação e geração de pares elétron-buraco não foram explorados pelo estudante.



condução e banda de valência [é] onde ocorre o efeito da luz” e completa “à medida em que o elétron se distancia do núcleo os níveis de energia tendem a aumentar, e se aproxima, ou quando muitos elétrons se agrupam, os níveis vão ‘diminuindo’ por isso a maior probabilidade de encontrar elétrons está nos níveis de energia.”

A partir da análise dessas respostas, percebe-se que a assimilação de alguns conceitos por este estudante pode ter contribuído para evolução dos seus mapas. Vale salientar, inclusive, que o referido estudante apresentou uma das maiores médias em sua segunda versão elaborada. Mais conceitos da FMC foram elencados e melhor hierarquizados, indicando a aprendizagem de alguns tópicos da Física Quântica, como se observa nas figuras 41 e 42.

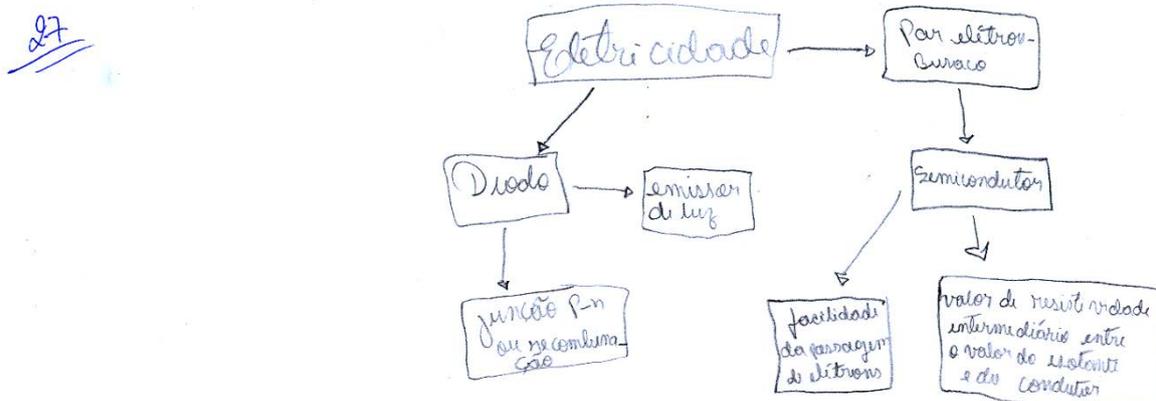


Figura 41. Primeira versão de mapa conceitual elaborado pelo Estudante 27

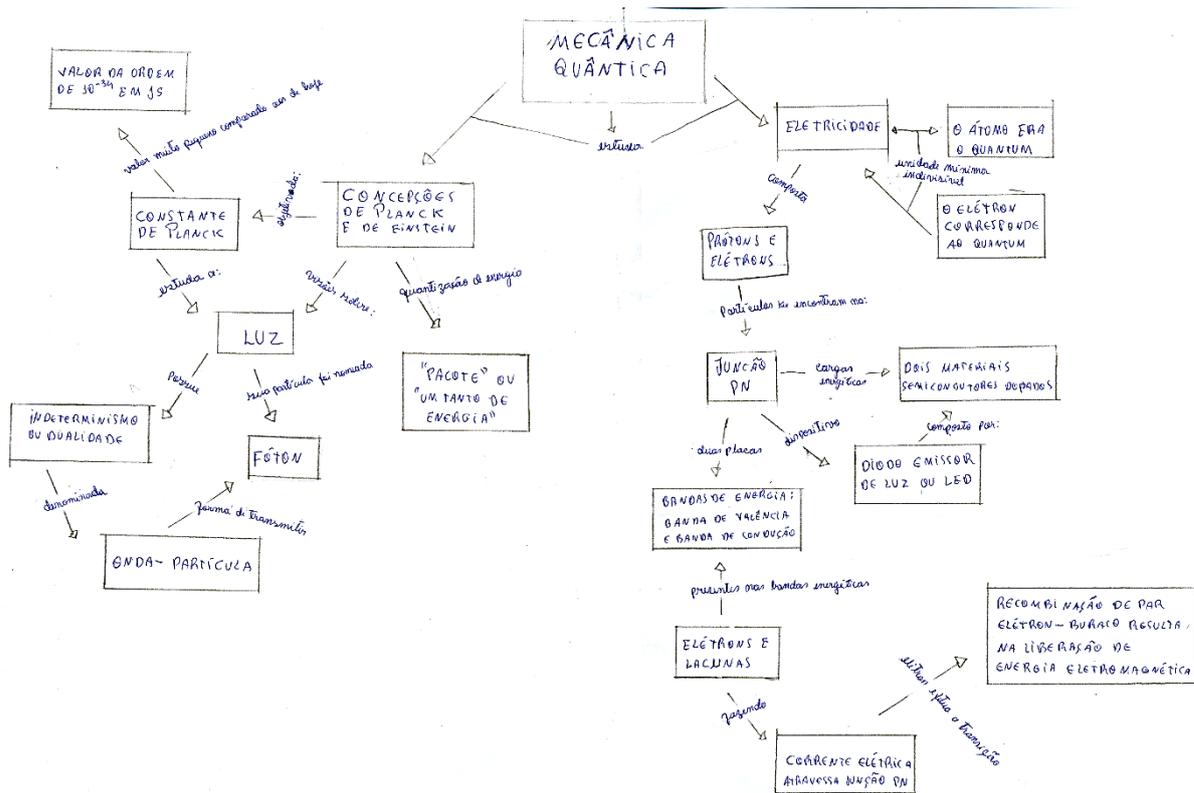


Figura 42. Segunda versão de mapa conceitual elaborado pelo Estudante 27.

Já os mapas conceituais dos Estudantes 05, 13, 23 e 24 apontaram pequenas melhorias na hierarquização dos novos conceitos. Alguns destes estudantes passaram a inserir conceitos da FMC como quantização, dualidade, incerteza, contribuindo para o aumento das notas de seus mapas. Entretanto, as ideias contidas nestes mapas não foram relacionadas corretamente, indicando o quanto a aprendizagem desses conceitos ficou comprometida. Os conceitos foram simplesmente apontados sem interconexão e sem a utilização de palavras chaves de ligação. Além disso, outros termos foram inseridos e ficaram “perdidos” na estrutura desses mapas. Apresentamos, por exemplo, as versões dos mapas conceituais do Estudante 13 (Ver figuras 43 e 44).



Comparando as informações dos mapas que apresentaram pequenas ou nenhuma melhoria com os Quadros 6 e 7, verificamos que os Estudantes 03, 05, 13, 20, 23, 24, 26, 30 participaram da maioria das atividades avaliativas. Entretanto, muitos destes tiveram baixo desempenho no Questionário 6.

Ao observar as informações contidas nas respostas dos Questionários 4 e 5, identificamos incoerências nas ideias dos Estudantes 05, 13, 20, 23 e 26. Muitas das respostas não condiziam com o que foi discutido em sala. Boa parte destes estudantes optaram por deixar de responder algumas das questões, revelando assim, muita insegurança e pouca assimilação dos conteúdos.

Em vista disso, estamos convencidos de que os conceitos da Física Quântica abordados na UEPS não foram aprendidos significativamente por estes estudantes. Para se ter uma ideia, alguns destes estudantes mal conseguiram responder à primeira questão dos questionários ou apresentaram algum equívoco nas respostas. Para exemplificar, a resposta dada pelo Estudante 13 para esta mesma questão, em ambos os questionários, foi a seguinte: “*em energia elétrica*”. Como se percebe, a resposta é vaga, sem maiores explicações para classificar os materiais quanto à condução de corrente elétrica, como solicitava a questão. A resposta dada a esta e outras questões por este estudante pode justificar as médias da qualidade de seus mapas elaborados, como visto anteriormente.

Outros mapas conceituais, com suas evoluções ao longo do processo, embora não tivessem sido destacados na análise dos resultados estão disponíveis no Apêndice 15.

## **6.2 Aprendizagem: Possibilidades da aplicação da UEPS**

Observando o Gráfico 3, destacamos a evolução de alguns mapas conceituais. Mais precisamente, 11 dos 16 mapas construídos apresentaram melhorias dos aspectos (ou de alguns dos) de qualificação se comparados com suas respectivas versões anteriores. Confrontando este resultado com as informações contidas do Quadro 7, podemos concluir que a disposição destes 11 estudantes em responder a maioria dos questionários propostos na UEPS foi fundamental para o desenvolvimento e melhoria dos mapas confeccionados. Destes, 03 mapas se destacaram por possuírem melhorias significativas em alguns dos aspectos





significativa dos conceitos foi facilitada pelo processo de diferenciação progressiva e reconciliação integrativa.

É importante também notar como os Estudantes 02 e 27 se destacaram entre àqueles que confeccionaram a segunda versão do mapa conceitual de forma adequada, mesmo não participando das duas primeiras etapas avaliativas. Outra evidência da evolução destes estudantes é o número de acertos de questões do Questionário 6 (ver Quadro 6), o que demonstra o bom desempenho dos mesmos.

Considerando e comparando as respostas dadas nos Questionários 4 e 5 por estes estudantes (01, 02, 25 e 27) percebemos indícios da Aprendizagem Significativa (AS) de alguns tópicos da FMC por alguns destes. O Estudante 01, por exemplo, passou a responder à Questão 04 explicando o porquê os níveis de energia passariam a formar bandas ao invés de permanecerem discretizados com o agrupamento dos átomos. Segundo ele, *“a perturbação dos elétrons seria tão grande que não valeria mais pena falar em camadas e sim em bandas de condução e de valência”*.

O Estudante 27 respondeu à questão de forma diferente, porém, considerando os aspectos abordados em sala: *“Acontece que quando os átomos vão se juntando, os espaços dos níveis vão diminuindo até ficarem bem juntos”*. Esta última resposta indica que este estudante respondeu à questão diante da abordagem pictórica do fenômeno quântico abordado na Aula 08.

Os Estudantes 02 e 25 apresentaram dificuldades em responder a esta questão. Estes estudantes, que antes não haviam respondido a esta questão no Questionário 4, preferiram responder à esta questão, no Questionário 5, da seguinte maneira, respectivamente: *“Por que quando os átomos se aproximam um dos outros, eles se agitam e formam bandas.”*; *“Um grande número de átomos se agrupam eles formam um sólido.”*

Outras respostas interessantes dos mesmos questionários também indicaram AS dos conceitos da FMC pelos Estudantes 01 e 27. As respostas dadas pelo Estudante 01, para explicar o movimento dos portadores de cargas (questões 07 e 08), por exemplo, apontavam para a simetria dos movimentos dos elétrons e lacunas. Segundo o estudante, *“lacunas são espaços deixados pelos elétrons que saem dos seus ‘lugares’ [...]. Cada elétron ocupa o espaço deixado pelo elétron que partiu primeiro. Assim, dá a ideia de que o buraco está se movendo”*. Os Estudantes 02 e 25, em ambos os questionários, preferiram não responder a estas questões. O

Estudante 27 respondeu de maneira semelhante à resposta do Estudante 01, porém com outras palavras: *“No momento em que um elétron sai de uma ligação para ocupar o buraco que havia em outra ligação, no lugar onde ele estava, fica uma lacuna, e um outro elétron de outra ligação o preencherá e assim a lacuna passa de ligação em ligação”*.

Vale destacar que outros estudantes também explanaram corretamente os conceitos da Física Quântica para estas e outras questões. No entanto, iremos priorizar as respostas dos questionários para tentar justificar o processo de construção e evolução dos mapas elaborados.

Apenas 4 estudantes, dos 16 que elaboraram as duas versões, conseguiram hierarquizar bem as ideias desses mapas (Estudantes 01, 12, 17 e 19). Estes mesmos estudantes além de terem participado de todas as etapas avaliativas, obtiveram um bom desempenho no questionário com questões de múltipla escolha (Questionário 6), como é evidenciado no Quadro 6. Entretanto, verificamos que apenas o Estudante 12 (destes supracitados) respondeu incorretamente a algumas questões do mesmo questionário. O que pode ter ocorrido é a forma como o referido estudante se dedicou ao questionário. Como várias atividades avaliativas foram propostas no dia, um tempo maior pode ter sido gasto pelo estudante para responder ao Questionário 5 e para a elaboração da segunda versão do mapa conceitual.

Quando comparamos as respostas dos Questionários 4 e 5 deste grupo de estudantes, identificamos trechos relevantes que podem ter contribuído para o melhoramento de seus mapas conceituais. Fragmentos das respostas indicavam a AS de alguns conceitos da Física Moderna. As respostas da Questão 03 do Questionário 5, por exemplo, que se referia às ligações dos átomos de um condutor, isolante ou semicondutor, apontaram para alguns aspectos da teoria quântica. O Estudante 01 aprimorou a resposta desta questão, indicando *“desordem”* dos elétrons em *“locais específicos (camadas)”*. No questionário anterior o estudante respondeu em poucas palavras: *“Em ordem ou desordem”*.

O Estudante 12, possivelmente influenciado pela intervenção no segundo momento da UEPS, quando foram abordados os modelos atômicos, respondeu: *“Eles [os elétrons] estão distribuídos em órbitas ao redor do núcleo de maneiras específicas”*. A resposta dada para a mesma questão no Questionário 4 foi: *“Vai*

*depende se é um condutor, semicondutor ou isolante. A partir disso ver o tipo de ligação. Pois eles [elétrons] podem estar dispersos, ou mais juntos.”*

O Estudante 17 que antes não havia respondido a esta questão, simplificou a resposta em duas palavras: “*níveis e bandas*”. Não muito diferente, o Estudante 19 indicou o compartilhamento de elétrons no Questionário 4 e, posteriormente, no Questionário 5, destacou a localização “*específica*” dos elétrons em “*órbitas (níveis e camadas)*”.

Algumas respostas dadas por estes mesmos estudantes para a Questão 04, do referido questionário, indicavam a AS pela contribuição do processo de diferenciação progressiva e reconciliação integradora. Isto é, alguns estudantes passaram a assimilar os conceitos mais específicos da teoria quântica a partir de algumas ideias ancoradoras destacadas ao longo da UEPS que propiciaram a explicação de conceitos num nível mais elaborado e cientificamente mais aceito.

A Questão 04, como já foi dito, referia-se à formação de bandas a partir da aproximação de uma quantidade muito grande de átomos. Muitos estudantes haviam deixado em branco esta questão no Questionário 4. No entanto, as contribuições da segunda parte da UEPS foram fundamentais para que boa parte destes tivessem mais segurança para responder ao Questionário 5. Segundo o Estudante 12, por exemplo, “*a presença de vários átomos propicia uma perturbação entre eles*”. Os Estudantes 17 e 19 destacaram o aspecto ondulatório no mundo microscópico. O Estudante 19 responde da seguinte forma: “*Como neste caso o elétron é uma onda, quanto mais perto o átomo estiver um do outro, as ondas se perturbam e os níveis que estão próximo se tornam bandas.*”

Como se observa nas respostas desses estudantes, a utilização de alguns recursos no segundo momento da intervenção foi fundamental para a assimilação da formação de bandas de energia devido à combinação dos orbitais atômicos. Embora não tivesse sido abordada a formulação de Schrödinger para as funções de onda dos átomos, a visualização das densidades de probabilidades para os elétrons foi imprescindível para que os estudantes pudessem ressignificar o conteúdo mais inclusivo.

Ainda considerando os mesmos Estudantes (01, 12, 17 e 19), verificamos que todos conseguiram responder satisfatoriamente a outras questões do Questionário 5. Desde o Questionário 4 estes estudantes já indicavam a assimilação e diferenciação

das características dos diferentes tipos de materiais quanto à condução de corrente elétrica (Questões 01 e 06). Além disso, definiram muito bem o conceito de “buraco” (ou lacuna) e propuseram boas explicações para o movimento dos portadores de cargas (Questões 07 e 08). Ainda é importante destacar que todos estes estudantes assinalaram a alternativa correta para as Questões 06 e 10, em ambos os questionários. Tudo isso revela a assimilação dos tópicos da Física Moderna abordados, implicando no melhoramento dos mapas conceituais elaborados, como indica o Gráfico 3.

De todos os estudantes voluntários envolvidos na pesquisa que tentaram responder à Questão 09 do Questionário 5, apenas o Estudante 19 conseguiu explicar a necessidade da dopagem para o funcionamento dos LEDs, afirmando que este “*só funciona com a junção PN, onde há um encontro de elétron-lacuna*”. Outras respostas, embora considerassem o processo de recombinação e liberação do fóton, não indicavam o movimento dos portadores em cada material. Assim, elas demonstram estar incompletas, pois, como sabemos, o “encontro” do elétron-lacuna só é possível quando os portadores de cargas se movem em sentidos opostos na junção PN, e somente nesta junção!

Identificamos também certa insegurança da maioria dos estudantes ao tentar responder à Questão 02. Esta solicitava a descrição microscópica para diferenciar condutores, isolantes e semicondutores, ou seja, diferenciá-los a nível atômico. Provavelmente, ela não foi bem interpretada por estes estudantes, uma vez que preferiram deixá-la em branco tanto no Questionário 4 como no Questionário 5. Apenas uma minoria dos estudantes conseguiu interpretá-la corretamente referindo-se às ligações químicas e até mesmo à distribuição dos elétrons em cada material.

### **6.3 Análise dos conceitos assimilados – Questionário 6**

Analisando especificamente as respostas do Questionário 6, os Gráficos 1 e 2 sinalizam os conceitos mais compreendidos pelos estudantes. O conceito de fóton, por exemplo, merece destaque. Os Gráficos 1 e 2 indicam que a questão com maior número de acertos foi a Questão 02, o que pode revelar que houve a AS do conceito Fóton e, possivelmente, de quantização. Entretanto, vale salientar, que como esta foi uma questão de múltipla escolha, os estudantes podem ter marcado a alternativa que

se referia ao fóton por fazer referência a uma das palavras mais comentadas durante a UEPS. Conceitos de *bárions*, *dipolos*, *íons* e *pulsos* não foram explorados e, portanto, os acertos não necessariamente implicariam na AS do conceito Fóton.

Um dos mapas conceituais que comprova a AS do conceito fóton e quantização é o mapa da segunda versão, elaborada pelo Estudante 01. Ao observar, hierarquicamente, as ideias do lado esquerdo do mapa, podemos destacar a expressão: “*Luz*’ *tem comportamento*’ *dual*’ *é*’ *partícula*’ *ligada ao*’ *fóton*’ *gerado entre*’ *bandas de energia*”. Da mesma forma, identificamos expressões que apontam para o comportamento dual dos elétrons.

Outra questão que a maioria dos estudantes teve êxito ao solucionar o Questionário 6 foi a 05 (ver Gráficos 1 e 2). Embora tivesse ocorrido a problematização e caracterização de diversos tipos de junções dos semicondutores dopados (NN, PP, PN), através de simulações, a junção PN foi a mais explorada em sala de aula, principalmente para explicar o funcionamento dos LEDs e da fotocélula. Isto pode ter contribuído para que grande parte dos estudantes assinalassem a alternativa que abordava sobre a junção PN.

Embora muitos tivessem acertado a Questão 01, alguns estudantes acreditavam que a energia captada pelos painéis seria primordialmente a energia térmica. Como sabemos, existe a contribuição da energia térmica na produção de energia elétrica. Mas a energia que estimula os elétrons a saltarem entre as bandas de energia (valência para condução) é a energia luminosa ou comumente conhecida como eletromagnética. No entanto, o termo “eletromagnética” foi um termo pouco usado ao longo da UEPS, o que pode ter confundido os estudantes.

Da mesma forma, identificamos a baixa familiarização de alguns termos básicos da Física por estes estudantes. Isso pode ser evidenciado a partir da análise das concepções prévias sobre o conceito de “luz”. No Questionário 1, identificamos respostas como “*iluminação e claridade*”. O termo “*energia*” também foi muito utilizado. Alguns associaram a luz ao Sol e às fontes elétricas. E apenas um estudante retratou de forma mais complexa a luz como associado aos átomos ou ao campo eletromagnético.

Outra resposta que nos chamou a atenção foi dada por um único estudante (Estudante 12) ao responder à 2ª questão do Questionário 01. Sua concepção prévia sobre os dispositivos que podiam emitir luz extrapolou a visão dos outros estudantes

que haviam respondido “lua, velas, lâmpadas, celulares, refletores, etc”. O Estudante 12 registrou em sua resposta “*raios-x*”. Essa concepção indica a luz como radiação eletromagnética e não como simplesmente algo que ilumina, como enfatizado pelos outros.

Retomando ao Questionário 6, muitos estudantes acertaram a Questão 04 que se referia a qual modelo atômico incluía o conceito de fóton, mas como alguns preferiram marcar as alternativas B e D, pode-se inferir que boa parte dos estudantes sabia que não foi o modelo de Thompson que contribuiu para a inclusão do conceito de fóton; Porém, alguns não lembravam da ruptura epistemológica do modelo atômico de Rutherford para o modelo de Bohr, no que se refere à quantização, que fora abordada no documentário sobre a evolução dos modelos atômicos.

Como indicam os Gráficos 1 e 2, as respostas das Questões 03, 06 e 08 revelaram algumas incertezas dos estudantes. Alguns estudantes confundiram, por exemplo, a estrutura atômica dos semicondutores não-dopados e os semicondutores dopados tipo N e tipo P na Questão 06.

A Questão 08, também pode ter confundido os estudantes, embora foi respondida corretamente pela maioria dos estudantes que responderam ao Questionário 6. O conceito de banda proibida (também conhecida como Gap de Energia) foi abordado a partir da exibição de algumas imagens para diferenciar a condutividade nos sólidos. No entanto, durante a exibição destas imagens, o termo mais usado pelo professor foi o de “banda proibida” o que pode ter confundido alguns estudantes.

Os estudantes que erraram a Questão 03 podem não ter assimilado muito bem o princípio da conservação de energia no funcionamento dos LEDs. Isto é, para que o fóton seja emitido, os elétrons devem “saltar” de órbitas mais energéticas para órbitas menos energéticas. A expressão “átomos excitados”, presente no enunciado desta questão, pode ter confundido alguns dos estudantes que preferiram marcar a opção “C” (*um dos elétrons desloca-se para níveis de energia mais altos, afastando-se do núcleo*).

As questões do Questionário 6 que indicaram menor apropriação e assimilação pelos estudantes foram as Questões 07 e 09. Estas questões que estão também diretamente relacionadas com a Questão 10, revelaram a incerteza de alguns estudantes e a pouca habilidade em questões de cálculo. Embora tivessem

respondido corretamente à Questão 10, alguns estudantes não estabeleceram relações entre a energia de gap e a energia de emissão dos fótons nos LEDs e, conseqüentemente, com a cor emitida por estes dispositivos. Ou seja, apresentaram dúvidas conceituais, o que pode ter intimidado a estruturar o cálculo da Questão 09. De acordo com o Quadro 6, dos 25 estudantes que responderam ao Questionário 6, apenas 6 estudantes tentaram fazer o cálculo da Questão 09.

Isto mostra a dificuldade dos estudantes em solucionar questões que necessitam de habilidades com as ferramentas matemáticas. Os estudantes voluntários optaram por gastar boa parte do tempo em questões conceituais, mesmo com as dificuldades enfrentadas.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados da pesquisa evidenciam que nosso produto educacional – Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) – contribuiu, não somente no sentido de promover inovações curriculares no ensino médio, suprimindo com a escassez dos conteúdos da Física Moderna no ambiente escolar, como também, e principalmente, o de repensar o papel do professor em sala de aula para que suas ações impliquem na Aprendizagem Significativa de teorias da Física.

Boa parte das teorias modernas elencadas na UEPS tinha como propósito a contextualização com fenômenos físicos observados facilmente pelos jovens nos dispositivos tecnológicos atuais. Como vimos, a compreensão do funcionamento de muitos destes dispositivos, como a fotocélula e os LEDs, somente é possível quando se leva em conta as teorias da Física do Século XX. A “nova Física” precisa sempre entrar em cena para uma melhor descrição da distribuição dos elétrons nos sólidos semicondutores e o movimento dos portadores de cargas nesses materiais.

Além disso, a recombinação de elétrons-buracos e a geração destes pares, fenômenos que ocorrem na junção de materiais semicondutores dopados, são facilmente entendidos quando se considera a Teoria de Bandas nos sólidos, tratada pela Física Quântica. A formação de bandas contínuas nos sólidos foi uma das teorias contidas na UEPS.

Nesta UEPS, elaborada num viés construtivista e embasado na Teoria de Aprendizagem Significativa de Ausubel, nos preocupamos em abordar os fenômenos da eletroluminescência e do Efeito Fotovoltaico a partir da discussão das teorias da Física Quântica. Em sala de aula, foram discutidos os seguintes conceitos: quantização da matéria e da luz – a energia do fóton foi associado ao salto quântico dos elétrons entre as bandas de energia (condução e valência); ondas de matéria – para tratar o problema do elétron no potencial periódico<sup>15</sup>; interpretação probabilística da função de onda – ao discutir a formação de bandas a partir da aproximação de átomos de hidrogênio, foi mostrado a curva da densidade de probabilidade para o elétron confinado ou não, no átomo. Foram também discutidas, as perturbações das funções de onda e suas combinações lineares na aproximação de muitos átomos –

---

<sup>15</sup> No modelo de Kronig-Penney por exemplo, foi necessário considerar o comportamento ondulatório dessas partículas

simulações e imagens foram usadas na UEPS para mostrar os resultados destas combinações.

Com a utilização de vídeos, animações, simulações e imagens, tentamos minimizar a abstração da maioria desses conteúdos abordados. Preferimos adotar esta estratégia de modo a facilitar a aprendizagem, sem que fosse necessário a complexa descrição matemática de alguns modelos. A descrição matemática poderia, inclusive, mostrar com maior precisão os resultados dos modelos trabalhados em sala. No entanto, focamos na discussão qualitativa destes resultados, considerando as premissas dos principais problemas tratados da Física Quântica. Deixamos claro para os estudantes que, embora os modelos estudados fossem facilmente tratados, muitos destes não poderiam representar a realidade e, dificilmente, teríamos êxito ao descrevê-los.

O confinamento do elétron numa caixa, por exemplo, embora tivesse sido um problema considerado nas simulações apresentadas aos alunos durante a aplicação da UEPS, dificilmente poderia representar o real confinamento proporcionado pelo potencial atômico (muito mais complexo que uma caixa quadrada) e pelos potenciais resultantes da rede cristalina num semicondutor (modelo de Kronig-Penney).

A descrição simplificada para o problema do elétron no sólido contribuiu para a assimilação da formação de bandas de energia no sólido semicondutor. Concordamos com o Knight (2012, p. 1277) ao afirmar que “qualquer situação em que uma partícula esteja confinada pode ser modelada por um poço de potencial finito”. Não somente isso, acreditamos que este modelo pode ter facilitado a Aprendizagem Significativa (AS) da formação de bandas nos sólidos, servindo também como ideia ancoradora ao longo do processo de ensino-aprendizagem das teorias abordadas. Vale salientar que a Teoria de Bandas é extremamente necessária para a compreensão do funcionamento de muitos dispositivos semicondutores.

Com base na UEPS construída e na intervenção realizada em sala de aula, alicerçadas nos referenciais teóricos citados e, articulando nossos propósitos com a análise das discussões dos resultados, podemos considerar que nossos objetivos foram alcançados.

O produto (UEPS) compartilha com os ideais da Teoria de Aprendizagem de Ausubel (Moreira, 2011a), a qual levou em conta a interação entre uma ferramenta educacional com os conhecimentos prévios dos estudantes, bem como proporcionou

a assimilação de novos conceitos da Física. Elaboramos uma UEPS visando a inserção dos tópicos da Física Moderna e dos fenômenos destacados, a partir de um conteúdo mais geral e com alto grau de inclusividade. Num primeiro momento, tivemos que considerar as concepções alternativas dos estudantes acerca dos fenômenos envolvendo transformações de energia em dispositivos semicondutores. Em seguida, a sequência de aulas passou a considerar a aquisição de novos significados em função do processo interacional de ensino.

Como pudemos evidenciar na sequência didática elaborada, várias situações-problemas foram apresentadas aos estudantes em níveis de complexidade distintos, mas sempre considerando o conhecimento presente na estrutura cognitiva do aprendiz. Os novos conceitos somente foram melhor discutidos após a utilização de alguns organizadores prévios, como hiperímia, imagens, vídeos e animações apresentados em diversos momentos da intervenção. A partir desta estratégia, acreditamos que a UEPS elaborada permitiu a aquisição de novos subsunçores pelos estudantes e as novas ideias que surgiram passaram a indicar a Aprendizagem Significativa (AS) de alguns conceitos da proposta.

A identificação destas novas ideias foi feita a partir da análise das respostas do Questionário 5 e da evolução dos mapas conceituais elaborados pelos estudantes ao longo da intervenção das aulas da UEPS. Estes instrumentos avaliativos, também utilizados para coleta de dados, revelaram que alguns estudantes assimilaram boa parte dos conceitos e teorias abordadas na intervenção. A organização hierárquica das ideias contidas em alguns mapas, por exemplo, indicou que os autores passaram a agregar, de forma significativa e sistemática, os diversos conceitos dissecados ao longo da intervenção em sala de aula.

O processo de hierarquização das ideias e a inserção dos conceitos da FMC foram os aspectos que tiveram avanços mais significativos quando comparamos as duas versões dos mapas conceituais. Isto é, muitos estudantes passaram não somente a inserir conceitos da FMC como também a correlacioná-los com os fenômenos trabalhados em sala de aula (funcionamento dos LEDs e da fotocélula).

Podemos inferir ainda que os estudantes que tiveram mais facilidade em relacionar as ideias na primeira versão de seus mapas conceituais foram os que conseguiram explorar e correlacionar a maior quantidade de conceitos da FMC em

suas versões finais. Outros mapas que tiveram pequenas melhorias no processo de hierarquização apontaram dificuldades em correlacionar conceitos.

É importante frisar que, mesmo diante dos resultados aparentemente promissores da análise destes mapas, não é possível afirmar com muita convicção que houve AS dos conteúdos abordados na UEPS, apenas há indícios de que ela ocorreu. Entretanto, ao confrontarmos as respostas contidas nos Questionários 5 e 6 com as ideias contidas nos mapas conceituais, percebemos que as respostas dadas pelos estudantes em algumas questões do Questionário 5 indicaram melhorias significativas quando comparadas com as respostas do Questionário 4 e os mapas conceituais correspondentes passaram por consideráveis evoluções ao longo do processo.

Boa parte dos estudantes elaboraram novas versões interligando melhor os conceitos a partir do conteúdo mais geral e inclusivo. Mas somente poucos estudantes demonstraram maior domínio em relacionar todas as ideias contidas em seus mapas. Além disso, ficou claro ao analisar os mapas destes estudantes que o processo de diferenciação progressiva, considerado também na confecção da UEPS, pode ter favorecido a AS dos conceitos destacados.

Em nossa experiência docente, identificamos algumas dificuldades enfrentadas pelos estudantes em solucionar questionários e elaborar mapas conceituais. Uma destas dificuldades estava relacionada com o tempo para conclusão destas e outras atividades. Alguns não puderam esperar até a finalização do horário proposto devido ao horário que tiveram que sair para não perder o transporte público. Outros se sentiram indispostos em realizar estas atividades.

Queremos chamar atenção para alguns desafios enfrentados no processo de aplicação da UEPS que podem ter contribuído para que alguns estudantes deixassem de entregar uma das versões dos mapas conceituais, além de terem se dedicado pouco à resolução das questões dos questionários. Os Quadros 1 ao 5 revelam a extensividade e complexidade da proposta no que tange a gama de conceitos e teorias consideradas na sua construção e as estratégias usadas na intervenção.

Esta proposta, todavia, poderia ser melhor trabalhada com os alunos em mais alguns dias de intervenção, de tal forma que os instrumentos avaliativos usados fossem aplicados com duração máxima possível. A adoção desta prática, certamente, contribuiria para melhorias nas respostas dadas nos questionários com escritas mais

densas (e com maior riqueza de detalhes de conteúdo) e para maior dedicação dos estudantes na construção dos mapas conceituais. Além disso, eventuais imprevistos de ordem técnica seriam evitados.

No tocante a utilização de simulações no ensino de Física, constatamos que, embora as simulações tivessem contribuído para a Aprendizagem Significativa das teorias abordadas, estes recursos poderiam ter sido melhor explorados em sala. A simulação desenvolvida neste trabalho deveria ter sido mais explorada com a interação dos próprios envolvidos na pesquisa. Dessa forma, a aplicação da proposta seria mais exitosa com o envolvimento mais ativo por parte dos estudantes no processo de ensino-aprendizagem.

Outro grande entrave enfrentado por nós, que merece ser destacado neste relato de experiência, foi a dificuldade de acesso aos computadores da instituição onde aplicamos a UEPS. A sala de informática era pouco utilizada pelos alunos e professores e muitos computadores estavam em desuso. Houve a necessidade de realizar uma boa manutenção nos computadores, um dia antes da intervenção, para mantê-los aptos a executar a hiperídia “semicondutores”. No dia da proposta, alguns acessórios como alto-falantes e mouses apresentaram problemas.

Ressaltamos que, apesar dos resultados bastante significativos, o nosso produto educacional ainda pode ser melhorado do ponto de vista da aplicabilidade e do ponto de vista técnico. Queremos deixar como sugestão o aprimoramento da Aula 07, de forma que sejam melhor explorados as Teorias do Princípio de Exclusão de Pauli, ocupação dos estados e Spin. Estes conceitos foram pouco discutidos em nossa intervenção, e a aula, como planejada, tornou-se exaustiva para os estudantes. Entretanto, vale salientar que nosso intuito nesta aula foi a de recuperar um assunto que geralmente é discutido nas aulas de química de 1º Ano e teria a função de conceito subsunçor para o novo conhecimento.

Acreditamos também que a Aula 06 poderia ser repensada em termos dos procedimentos metodológicos adotados. As informações contidas nos documentários exibidos podem não ter sido assimiladas pelos alunos devido, principalmente, ao idioma das mídias. Recomendaríamos para esta aula, a leitura de artigos relacionados com a moderna noção corpuscular da luz.

Por fim, reiteramos que os conteúdos contemporâneos trabalhados a partir do estudo da eletroluminescência e do Efeito Fotovoltaico, mostraram-se eficazes como

motivador em nossa prática docente. Os alunos mostraram-se interessados na investigação do funcionamento destes fenômenos, o que pode ter contribuído para a AS de conceitos da FMC. Isto comprova o êxito que a inserção de assuntos relacionados com o cotidiano dos alunos pode favorecer a assimilação das teorias da Física desenvolvidas a partir do Séc. XX.

Com esta pesquisa esperamos ter contribuído para que novas Unidades de Ensino desenvolvidas com base nesta perspectiva possam encorajar professores em discutir a Física Quântica em sala de aula. Além disso, recomendamos a produção de materiais de apoio para que professores tenham uma referência de roteiro para orientar as suas atividades.

## REFERÊNCIAS

- ALCÁCER, L. (2007). Introdução à Química Quântica Computacional. Lisboa: IST Press.
- AZEVEDO, C. E., Oliveira, L. G., & Gonzalez, R. K. (2013). A Estratégia de Triangulação: Objetivos, Possibilidades, Limitações e Proximidades com o Pragmatismo. IV Encontro de Ensino e Pesquisa em Administração e Contabilidade, 16.
- BORGES, M. D. (2005). Física Moderna e Contemporânea no Ensino (Médio: uma experiência didática com a Teoria da Relatividade Restrita. Dissertação de Mestrado. Porto Alegre, RS.
- CARMONA, A. G. (2006). Construcción de significados de física de semiconductores en educación secundaria: Fundamentos y resultados de una investigación. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 28, n. 4, p. 507-519.
- CARUSO, F. e. (2006). Física Moderna – Origens Clássicas e Fundamentos Quânticos. Rio de Janeiro, RJ: Ed. Campus.
- CAVALCANTE, M. A., & TAVOLARO, C. R. (2002). Uma aula sobre o efeito fotoelétrico no desenvolvimento de competências e habilidades. Física na Escola.
- CAVALCANTE, M. A., JARDIM, V., & Barros, J. A. (1999). Inserção de Física Moderna no Ensino Médio: Difração de um feixe laser. Cad.Cat.Ens.Fís., v. 16, n. 2: , agosto., p. 154-169.
- COLINGE, J.-P., & COLINGE, C. A. (2005). Physics of Semiconductor Devices. NEW YORK: Springer International Edition.
- Duarte, H. A. (2001). Ligação iônica, covalente e metálica. Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola, n.04, 10.
- EISBERG, R., & RESNICK, R. (1997). Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas. Rio de Janeiro, RJ: Editora Campus.
- GIL, A. C. (1999). Métodos e técnicas de pesquisa social. São Paulo: 5. ed. Atlas.
- GIL, D., & SOLBES, J. (1993). The introduction of modern physics: overcoming a deformed vision of science. International Journal of Science Education, Londres, v. 15, n. 3, p. 255-260.
- GOLDIN, L. L., & NÓVIKOVA, G. I. (1990). Introducción a la Física Cuántica. Editorial Mir Moscú.
- GRECA, I. M., & MOREIRA, M. A. (2014). Uma Revisão da Literatura sobre estudos relativos ao Ensino da Mecânica Quântica Introdutória. Investigações em Ensino de Ciências - ISSN 1518-8795, 27.

GRIEBELER, A., & MOREIRA, M. A. (2012). Tópicos de Física Quântica Para o Ensino Médio a Partir de Uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa. Textos de Apoio ao Professor de Física v. 23 n.6, 39.

GUIMARÃES, F. S., & MUNIZ, R. B. (2008). Corrente de spins em nanoestruturas metálicas. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal Fluminense. Niterói - Rio de Janeiro

KESSLER, S. L. (2008). O ENSINO DA FÍSICA MODERNA NO ENSINO MÉDIO: Necessidades e Dificuldades no Oeste Catarinense. Dissertação de Mestrado Educação em Ciências e Matemática.

Knight, R. D. (2012). Physics for scientists and engineers: a strategic approach (3ª ed.). United States: Pearson Education.

MARCONI, M. d., & LAKATOS, E. M. (2003). Fundamentos de metodologia científica. São Paulo: 5. ed. Atlas.

MCQUARRIE, D. A. (1996). The Kronig-Penney Model: A Single Lecture Illustrating the Band Structure of Solids. The Chemical Educator 1 / V O L . 1 , N O . 1.

MELLO, H. A., & BIASI, R. S. (1975). Introdução à Física dos Semicondutores. São Paulo-SP: Edgard Blücher Ltda.

MONTEIRO, M. A., NARDI, R., & FILHO, J. B. (2009). Dificuldades dos professores em introduzir a física moderna no ensino médio: a necessidade de superação da racionalidade técnica nos processos formativos. Scielo, 16.

MOREIRA, M. A. (1982). Aprendizagem significativa: a teoria de David Ausubel. São Paulo-SP: Moraes.

MOREIRA, M. A. (1992). Mapas Conceituais no Ensino de Física, n. 3. Texto de Apoio ao Professor de Física, 55.

MOREIRA, M. A. (1997). MAPAS CONCEITUAIS E APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA (Concept maps and meaningful learning). O ENSINO, Revista Galáico Portuguesa de Sócio-Pedagogia e Sócio-linguística, Pontevedra/Galícia/Espanha e Braga/Portugal, N° 23 a 28.

MOREIRA, M. A. (2011). Metodologias de Pesquisa em ensino. Porto Alegre: Livraria da Física.

MOREIRA, M. A. (2011). Teorias de Aprendizagem. São Paulo: EPU.

MOREIRA, M. A. (2011). Unidades de Ensino Potencialmente Significativas – UEPS. Aprendizagem Significativa em Revista/Meaningful Learning Review – V1(2), 63.

MOREIRA, M. A. (2014). Grandes Desafios para o Ensino da Física na Educação Contemporânea. XI Conferência Interamericana sobre Enseñanza de la Física, , (p. 12). Guayaquil, Equador.

MOREIRA, M. A., & Ostermann, F. (1999). Teorias Construtivistas. Textos de Apoio ao Professor de Física, n.10. Acesso em 2015

NELSON, J. (2003). The Physics of Solar Cells. Imperial College, UK.

Nussensweig, H. M. (1996). Curso de Física Básica Vol. 4. São Paulo - SP: Edgard Blücher.

OLIVEIRA, F. F., & VIANNA, D. M. (2007). Física moderna no ensino médio: o que dizem os professores. Revista Brasileira de Ensino de Física, São Paulo, v. 29, n. 3, p. 447-454.

OLIVEIRA, Ó. A., & FERNANDES, J. D. (2006). Ligação metálica e a teoria das bandas. Arquitetura atômica e molecular, 280.

OSTERMANN, F., & CAVALCANTI, C. J. (1999). Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio: Elaboração de Material Didático, em forma de pôster, sobre partículas elementares e interações fundamentais. Cad.Cat.Ens.Fís., v. 16, n. 3: p. 267-286, dez. , 286.

OSTERMANN, F., & MOREIRA, M. A. (2000). Uma Revisão Bibliográfica Sobre a Área de Pesquisa "Física Moderna e Contemporânea No Ensino Médio". Investigações em Ensino de Ciências – V5(1), pp. 23-48.

OSTERMANN F., L. F. (1998). Tópicos de física contemporânea no ensino médio: um texto para professores sobre supercondutividade. Revista Brasileira de Ensino de Física. Vol. 20. n3.

OSTERMANN, F., & PRADO, S. D. (2005). Interpretações da mecânica quântica em um interferômetro virtual de Mach-Zehnder. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 27, n. 2, p. 193 - 203.

OSTERMANN, F., PRADO, S. D., & Ricci, T. S. (2008). Investigando a Aprendizagem de Professores de Física Acerca do Fenômeno da Interferência Quântica. Ciência & Educação, v. 14, n. 1, 35-54.

PENA, F. L. (2006). Por que, nós professores de Física do Ensino Médio, devemos inserir tópicos e idéias de física moderna e contemporânea na sala de aula? Rev. Bras. Ensino Fís. [online], 1-2.

PINTO, A. C., & ZANETIC, J. (1999). É possível levar a física quântica para o ensino médio? Caderno Catarinense de Ensino de Física, Florianópolis, v. 16, n. 1, p. 7-34, abr., 34.

REZENDE, S. M. (2004). Materiais e dispositivos eletrônicos (2 ed.). São Paulo: Livraria da Física.

ROMANO, R. (2003). Estrutura e modelos de Ligação Química para semicondutores III-V e II-VI. São Paulo. Fonte: [http://lqes.iqm.unicamp.br/images/vivencia\\_lqes\\_monografias\\_ricardo\\_semicondutores.pdf](http://lqes.iqm.unicamp.br/images/vivencia_lqes_monografias_ricardo_semicondutores.pdf)

SAH, Chih-Tang. Fundamentals of solid-state electronics 1991. ISBN 9810206372.

SANCHES, M. B. (2006). A FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA NO ENSINO MÉDIO: QUAL SUA PRESENÇA EM SALA DE AULA? Maringá.

Serway, R. A., Moses, C., & Moyer, C. A. (2005). Modern Physics (3ª ed.). Canadá: Thomson Learning.

SILVA, A. C., & ALMEIDA, M. J. (2011). Física Quântica no Ensino Médio: o que dizem as pesquisas. Cad. Bras. Ens. Fís., v. 28, n. 624 3: p. 624-652, dez., 29.

SOARES, S., PAULO, I. C., & MOREIRA, M. A. (2008). Sugestões ao professor de Física para abordar tópicos de Mecânica Quântica no Ensino Médio. Textos de Apoio ao Professor de Física. V. 19 n. 4.

TERRAZZAN, E. A. (1992). A inserção da Física Moderna e Contemporânea no Ensino de Física na escola de 2º Grau. Cad.Cat.Ens.Fís., Florianópolis, v.9,n.3, 209-214.

VALADARES, E. d., CHAVES, A. S., & ALVES, E. G. (2005). Aplicações da Física Quântica do Transistor À Nanotecnologia. São Paulo - SP: Coleção Temas Atuais de Física / SBF livraria da física.

YU, P. Y., & CARDONA, M. (2010). Fundamentals of Semiconductors - Physics and Materials Properties (4 ed. ed.). New York: Springer.

## **APÊNDICES**

## APÊNDICE 01: Teoria dos Orbitais Moleculares (TOM)

Segundo Duarte (2001), este tratamento consiste em achar uma função de onda que minimize a energia total do sistema. O elétron ligado ao átomo é representado pelo orbital atômico (OA) com as mesmas características da função de onda.

Na união de dois átomos o compartilhamento de elétrons é entendido como uma sobreposição de orbitais atômicos e formação de dois novos orbitais desdobrados sobre esses átomos, denominados de orbitais moleculares (OM).

Neste modelo, os elétrons apresentam propriedades ondulatórias descritas por uma função que representa a resultante da interação de um elétron com todos os núcleos e elétrons dos átomos que constituem a molécula. Esta função é conhecida por função orbital. Entretanto, encontrar as soluções exatas da equação de Schrödinger para estas funções não é uma tarefa fácil. Como destaca Romano (2003), até mesmo para pequenas moléculas, algumas aproximações tornam-se necessárias devido à complexidade do problema. Uma destas aproximações é a combinação linear de orbitais moleculares (CLOM). Para melhor compreensão da CLOM, considera-se a simples formação de uma molécula de hidrogênio ( $H_2$ ).

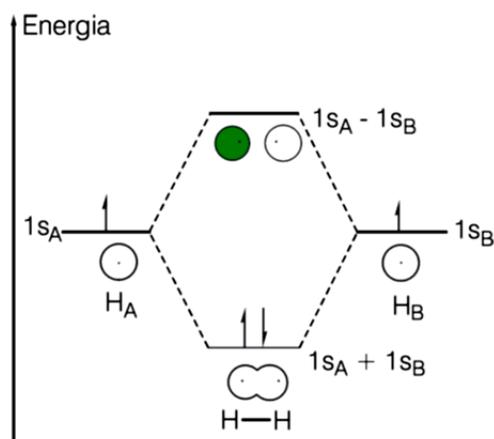
Cada átomo de hidrogênio isolado apresenta os níveis de energia permitidos (degenerados) e contém apenas um elétron no orbital 1s. Com a aproximação dos átomos, os orbitais 1s dos átomos se sobrepõem e duas combinações lineares tornam-se possíveis. Cada combinação dá origem a uma função de onda que descreve o elétron compartilhado entre os dois núcleos. Estas combinações ocorrem devido as sobreposições das funções de onda do elétron na formação molecular.

As sobreposições construtivas que correspondem às combinações dos orbitais em fase ( $\Psi_1 + \Psi_2$ ) gera um reforço na densidade eletrônica (aumento da energia ligante) entre os núcleos resultando na ligação química (ou mais simplesmente, orbital Molecular Ligante).

Por outro lado, na combinação fora de fase ( $\Psi_1 - \Psi_2$ ), ou sobreposição destrutiva, a densidade eletrônica é deslocada para as extremidades opostas da ligação, desfavorecendo a formação da molécula. Neste último caso temos a formação de um Orbital Molecular Antiligante onde a probabilidade de encontrar

elétrons entre dois núcleos é mínima, embora os elétrons possam estar próximos aos núcleos.

Na molécula de  $H_2$ , os dois elétrons (com spins opostos) passam a preencher um estado de menor energia (se comparado com o OA dos átomos separados), correspondente ao orbital ligante, garantido assim a estabilidade molecular. Duarte (2001) apresenta um diagrama para a formação dos referidos orbitais moleculares:



**Figura 47.** Esquema ilustrando as energias eletrônicas em orbitais moleculares na molécula  $H_2$  (DUARTE, 2001)

A Figura 47 mostra que cada átomo isolado possui apenas 1 elétron no orbital atômico 1s. Com a aproximação destes átomos, a molécula de  $H_2$  é formada e estabilizada com a ocupação dos dois elétrons (de spins opostos) no nível de menor energia, que corresponde ao OM ligante, onde a totalidade de OA foram combinados em fase. Segundo Duarte (2001) a formação e ocupação desses orbitais moleculares pode também explicar as ligações químicas.

A combinação linear dos orbitais atômicos localizados pode ser escrito como  $\Psi_{AB} = C_A \Psi_A \pm C_B \Psi_B$  levando-se em conta as contribuições de cada átomo na formação dos OM ligante e antiligante. Os coeficientes  $C_A$  e  $C_B$  determinam a participação dos OA dos elementos A e B. Além disso, esta equação leva em conta a simetria dos átomos e as discrepâncias energéticas dos OA. Para átomos idênticos, como na formação da molécula de  $H_2$ , dá-se o mesmo peso aos OA 1s de cada átomo ( $C_A = C_B$ ) e, como visto, a sobreposição garante a estabilização dos átomos. Para moléculas heteronucleares, à medida que os orbitais atômicos dos átomos se distanciam energeticamente, há uma redução da sobreposição dos orbitais. No limite para

elevada discrepância, o caráter iônico é evidenciado devido à diferença de eletronegatividade os átomos.

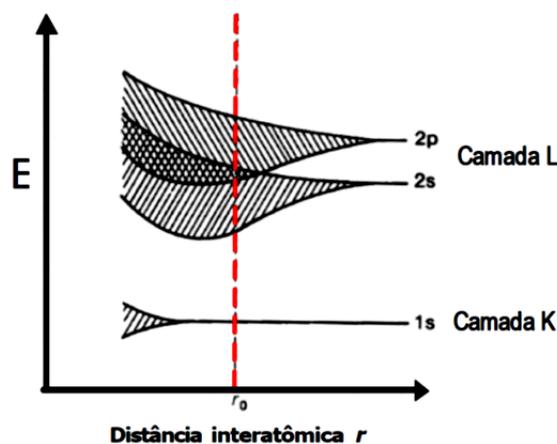
De maneira geral, a extensão da sobreposição dos orbitais de vários átomos, ou melhor, o grau de contribuição destes orbitais contribui para os níveis de energia dos orbitais moleculares ligantes e não ligantes. Orbitais de menor raio combinados não geram sobreposições “importantes” como os orbitais atômicos de valência que mais contribuem para a formação da molécula. Estendendo-se a TOM para a formação do sólido, ou número grande de moléculas (N), a combinação linear dos N orbitais de valência resultará em N OM com diferentes energias – OM de menor energia corresponde a combinação em fase dos OA e o OM de maior energia corresponde a combinação fora de fase entre N orbitais. (ROMANO, 2003)

Quanto menos espaçados estiverem os átomos do sólido, maior será a interação dos orbitais atômicos e, devido ao número elevado de átomos, os níveis de energia resultantes apresentarão mínima separação originando bandas contínuas de energia.

A combinação linear de N OA resulta na formação de N OM, cujas diferenças de energia entre os OMs formados são tanto menores quanto maior for o número de átomos que formam as ligações. Como consequência, o espaçamento entre os níveis de energia dos OM diminui consideravelmente, tornando-se tão próximos uns dos outros, que, em lugar de níveis discretos de energia, como ocorre em moléculas pequenas, teremos um conjunto de níveis ou estados de energia, com intervalo virtualmente contínuo. Tais intervalos são chamados de bandas de energia. (OLIVEIRA & FERNANDES, 2006, p. 4)

A combinação das bandas formadas da sobreposição dos orbitais são geralmente separadas por um intervalo de energia, representado por  $E_g$ , conhecido como *gap* de energia. Segundo Oliveira & Fernandes (2006), quando há proximidade entre as energias de determinados orbitais, as bandas formadas são mais largas e podem sobrepor-se, não ocorrendo intervalo (*gap*) entre essas bandas.

A Figura 48 é um esquema apresentado por Romano (2003) para descrever a formação de bandas para um número de moléculas muito grande (N). Quanto menor o espaçamento entre os átomos do sólido, maior será a força de interação dos orbitais atômicos.

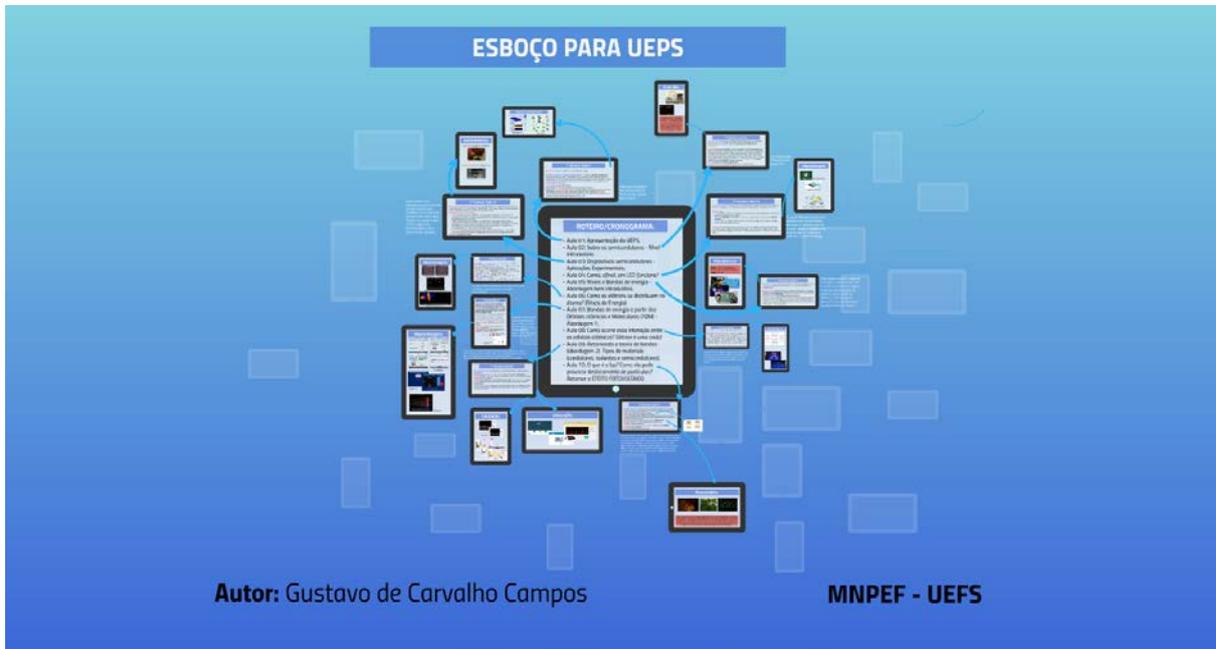


**Figura 48.** Representação da formação de bandas em sólidos a partir de orbitais atômicos discretos. (Romano, 2003, p. 11)

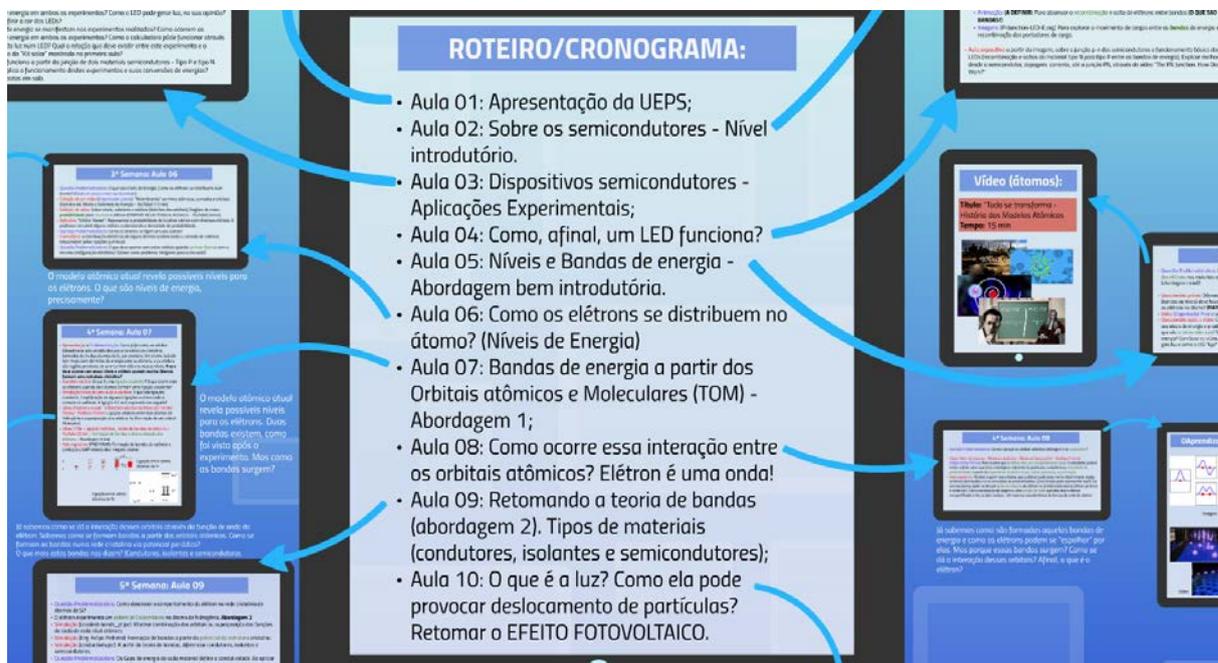
A figura também indica que quanto maior for a separação energética entre os estados, mais larga será a banda de energia. O orbital 1s (de menor energia) mantém-se discretizado em  $r_0$  indicando não estar envolvido na formação de um OM.

Segundo Duarte (2001), a maior vantagem da TOM é que nenhum conhecimento prévio de molécula é necessário, mas apenas as quatro constantes básicas da física: a velocidade da luz ( $c$ ), a constante de Planck ( $h$ ), a carga do elétron ( $e$ ) e o número atômico ( $Z$ ). Ao mesmo tempo o autor deixa claro que para configurações eletrônicas mais complexas com elementos da segunda linha da tabela periódica, o esforço computacional torna-se relevante.

## APÊNDICE 02: Primeira versão da UEPS construída



Slide com o esboço geral da primeira versão elaborada.



Slide com a proposta da sequência de aulas da primeira versão

## 00 aprendizagens:



**Simulação**

**Molecular Orbitals Explained**

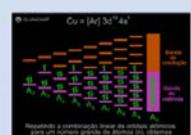


Vídeo 01

**Molecular Orbitals of Hydrogen**



Vídeo 02



**5ª Semana: Aula 09**

- **Questão Problematicadora:** Como descrever o comportamento do elétron na rede cristalina de átomos de Si?
- O elétron experimenta um **potencial Coulombiano** no átomo de hidrogênio; **Abordagem 2**
- **Simulação** (covalent-bands\_pt.jar): Mostrar combinação dos orbitais ou superposição das funções de onda de cada nível atômico.
- **Simulação** (Eng. Felipe Pinheiro): Formação de bandas a partir do **potencial da estrutura cristalina**.
- **Simulação** (conductivity.jar): A partir da teoria de bandas, diferenciar condutores, isolantes e semicondutores.
- **Questão Problematicadora:** Os Gaps de energia de cada material define a condutividade. Ao aplicar um campo elétrico, pode ser estabelecida uma corrente elétrica. O que mais poderia deslocar os elétrons entre as bandas?

foi visto após o experimento. Mas como as bandas surgem?

Já sabemos como se dá a interação desses orbitais através da função de onda do elétron. Sabemos como se formam bandas a partir dos orbitais atômicos. Como se formam as bandas numa rede cristalina via potencial periódico? O que mais estas bandas nos dizem? (Condutores, isolantes e semicondutores).

Slide com a proposta do tratamento da TOM (abordagem alternativa).

## APÊNDICE 03: Última versão elaborada da UEPS – Aplicada em Sala



Slide com o esboço geral da última versão elaborada – maior simplicidade.

do problema técnico. O aluno conhece parte da energia elétrica e sabe lidar. Então, alguns fluxos de trabalho passa entre luz?

Essa ideia substituiu os demais fluxos surgem após a pergunta? O conteúdo abordado em: aplicações – Experimentos em sala de aula – experimentos em sala de aula

**Objetivo** Preparar o aluno para o entendimento e funcionamento do LED e de outros dispositivos semicondutores. Será dividido em dois grupos, cada grupo comente para a turma sobre, benefícios, e importância da aplicação.

**Atividade 1** Avaliar o conhecimento prévio e a extensão dos experimentos em 2 grupos grupos, baseando-se em: identificação de novos dados.

**Atividade 2** Avaliar o conhecimento prévio.

Essa ideia substituiu os demais fluxos surgem após a pergunta? O conteúdo abordado em: aplicações – Experimentos em sala de aula – experimentos em sala de aula

**3ª Semana: Aula 05**

**Questionário 4:**

**4ª Semana: Aula 08**

**5ª Semana: Aula 09**

**6ª Semana: Aula 10**

**7ª Semana: Aula 11**

**8ª Semana: Aula 12**

**9ª Semana: Aula 13**

**10ª Semana: Aula 14**

**ROTEIRO/CRONOGRAMA:**

- Aula 01: Apresentação da UEPS;
- Aula 02: Sobre os semicondutores - Nível geral e introdutório.
- Aula 03: Dispositivos semicondutores - Atividades experimentais;
- Aula 04: Como um LED e a fotocélula funciona? Abordagem inicial: Bandas.
- Aula 05: Tipos de materiais (condutores, isolantes e semicondutores); Junção PN.
- Aula 06: E afinal, o que é a luz? E matéria?
- Aula 07: Níveis e Bandas de energia. Como os elétrons se distribuem no átomo?
- Aula 08: O que acontece ao aproximar vários átomos?
- Aula 09: Retomar aos dispositivos semicondutores (LED e fotocélula). Aplicação da equação  $E=hf$ .
- Aula 10: Processo avaliativo final.

Slide com a proposta da sequência de aulas da última versão – maior simplicidade.

**1ª Semana: Aula 01**

- **Apresentar** os propósitos da SD que será aplicada na unidade;
- **CONHECIMENTOS PRÉVIOS**
  - Situação-problema: Como o LED e a fotocélula funcionam? (Estender para dispositivos semicondutores);
- **Mostra de dispositivos:** lâmpadas incandescentes, fluorescentes e lâmpadas de LEDs; kit robô solar.
  - Solicitar que os alunos analisem os materiais.
    - **Princípio de conservação de energia.** Comentar após a exibição dos dispositivos.
- **Questionário 1** - após a apresentação da UEPS – Nível geral e mais inclusivo – identificação dos conhecimentos prévios.

Propor o estudo dos Semicondutores - materiais das células fotovoltaicas e do LED.

Slide com a proposta da aula 01 – Semana 01

## MOSTRA DE DISPOSITIVOS:



Evolução dos dispositivos de iluminação



Kit solar:

Slide com os recursos da aula 01 – Semana 01

## 1ª Semana: Aula 02

- **Questão Problematizadora:** O que são os semicondutores? Qual o tipo de material utilizado nestes dispositivos?
- **Apresentação** de uma **hipermídia** (**organizador prévio**) que esclarece a importância e uso dos **semicondutores**;
  - Facilitar a abordagem inicial dos semicondutores - principais características destes materiais.
- **Questionário em grupo** após a hiperídia (**Algumas servirão como organizadores prévios**); **Os alunos poderão acessar a simulação quantas vezes forem necessárias!**
- **Socializar** as respostas do questionário em grande grupo.
- **Questão Problematizadora:** Um diodo pode emitir luz?
- **OBS:** Diodos são constituídos de Si enquanto os LEDs são constituídos de outros elementos;

Semicondutores.  
Visão geral.

Slide com a proposta da aula 02 – Semana 01

## Hipermissão:

1. apresentação, condutores e isolantes (visão simplificada através da corrente elétrica); 2. Semicondutores (classe intermediária): átomos na camada de valência, exemplos de semicondutores; uso do silício e germanio; 3. sobre o silício: Ligação covalente; Lacunas; corrente intrínseca; 4. dopagem: trivalente e pentavalente; Tipo p e n; 5. Junção p-n; Diodos; 6. Aplicações; transistor; Chips e produtos.

• Questões –

• Questão Problemática dispositivos?

• Apresentação de uma

Slide com os recursos da aula 02 – Semana 01

## 2ª Semana: Aula 03

Experimentos com dispositivos constituídos de Semicondutores para incentivar a busca de mais conhecimento sobre estes. Mostrar um esquema para o LED e sugerir seu funcionamento básico.

- **Questão Problemática:** O diodo converte parte da energia elétrica em calor. Existe algum tipo de diodo que também possa emitir luz?
- Identificar **novos subsuores** (ex.: novas ideias surgiram após a hipermissão?)
- Utilizar **materiais potencialmente** significativos – Experimentos em sala (função: **organizadores prévios**);
- **Experimentos** (**organizadores prévios**) que evidenciem o funcionamento do **LED** e de outros dispositivos com semicondutores. Sala dividida em dois grupos; cada grupo apresenta para a turma socializando, também, a resposta do questionário;
- **Questionário 3:** após a interação dos alunos e a realização dos experimentos em 2 grandes grupos (atividade colaborativa) – identificação de novas ideias.
  - **Socializar** as respostas em sala.
- Identificar as **ideias abordadas** na hipermissão que foram ancoradoras para o novo conhecimento.

Slide com a proposta da aula 03 – Semana 02

## 2ª Semana: Aula 04

- **Questão Problematicadora:** Afinal, como estes dispositivos funcionam? Como o LED emite luz? Basicamente, o que define a cor do LED? E como a luz pode gerar corrente elétrica?
- **Conceituar bandas de energia existente nos materiais semicondutores – nível bem introdutório;**
- Utilizar **materiais potencialmente significativos** – Imagens, vídeos, animações e simulações (função: demonstrativos/ organizadores prévios para os novos conceitos);
- Diferenciar LEDs e fotocélula a partir dos seguintes processos: recombinação e formação de pares elétron-buraco (**diferenciação progressiva**);
- **Aula expositiva** a partir da imagem, sobre a junção p-n dos semicondutores e funcionamento básico dos LEDs (**recombinação** dos portadores de carga na junção e saltos entre as **bandas** de energia); Evidenciar que a luz pode ser entendida como pacotes de energia (**fótons**) e energia **quantizada** (predeterminadas pela **Energia de gap**).
  - **Vídeo:** (how does an led work - YouTube) para mostrar de forma simples o funcionamento do LED para geração da LUZ (apenas recombinação).
  - **Imagem:** (PnJunction-LED-E.svg) Para **explorar** o movimento de cargas entre as **bandas** de energia e recombinação dos portadores de carga.
  - **Animação** PVgeral.SWF para mostrar a importância do Sol e a produção de energia através da Luz.
  - **Animação:** (band-gap.SWF e Bands-LED.SWF) para explorar bandas e salto de elétrons entre bandas de condução e valência (LED e fotocélula).
- **Dinâmica** para demonstrar o movimento dos portadores
- **Discussão** em sala de alguns conceitos oriundos da **FMC – Quantização, saltos quânticos**.



Imagem (recombinação, bands)



Animação (Saltos quânticos)



Animação (Formação elétrons-buracos)

A junção PN como favorável ao deslocamento de portadores de carga e transformações de energia. Sugerir a existência de duas bandas - Condução e valência nos sólidos.

Slide com a proposta da aula 04 – Semana 02

## Recursos:



Vídeo (recombinação)

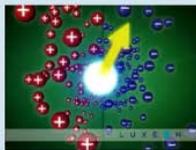
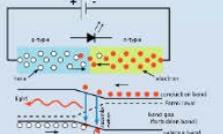


Imagem (recombinação, bandas e saltos)



Animação (Saltos quânticos)



Animação (Formação de pares elétrons-buracos)

Slide com os recursos da aula 04 – Semana 02

## 3ª Semana: Aula 05

- **Questão Problematizadora:** Porque estes dispositivos funcionam com a junção de dois materiais dopados, P e N? Porque os materiais semicondutores precisam ser dopados? A junção PN é imprescindível para o funcionamento do LED e da Fotocélula? Como a luz pode provocar o deslocamento dos portadores?
- **Bandas de energia** existente nos materiais semicondutores – nível exploratório e menos inclusivo;
  - Estrutura de bandas de alguns sólidos;
- Utilizar materiais **potencialmente significativos** – Imagens, vídeos, animações e simulações (função: demonstrativos/ organizadores prévios para os novos conceitos);
  - **Simulação** (semiconductor\_pt\_BR.jar): Explicar o funcionamento do diodo com a teoria de bandas. Evidenciar o movimento dos portadores com a junção e aplicação de tensão. Revelar a importância da Junção PN. Comparar o movimento de cargas em várias junções - NN, PN, PP.
  - **Simulação** (conductivity.jar): A partir da teoria de bandas, diferenciar condutores, isolantes e semicondutores.
- Propor novas **situações-problemas**. Ex.: o que deve definir a cor dos LEDs a partir da teoria de bandas?
- **Questionário 4** – Nível menos inclusivo.
- Construção do **primeiro mapa conceitual** a partir dos dispositivos semicondutores.

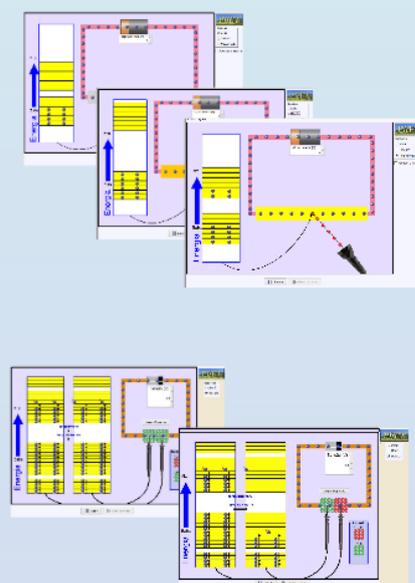
O que mais estas bandas nos dizem? (Condutores, isolantes e semicondutores.

Slide com a proposta da aula 05 – Semana 03

The slide titled "Recursos:" illustrates the energy band structure of different materials and its application in LEDs. At the top, three bar charts represent the energy bands for Conductors, Semiconductor, and Insulator. The conductor has a partially filled band, the semiconductor has a small gap between the valence and conduction bands, and the insulator has a large gap. Below these, two diagrams show the energy levels for LEDs. The first shows a "small gap" between the valence and conduction bands, resulting in "Red light emitted" from a red LED. The second shows a "large gap", resulting in "Yellow light emitted" from a yellow LED. The vertical axis is labeled "ENERGY".

Slide com os recursos da aula 05 – Semana 03

## SIMULAÇÕES:



Simular a junção de materiais NN, PP, e PN identificando as principais diferenças quando o semicondutor é ligado numa bateria. (Diferenciação progressiva);

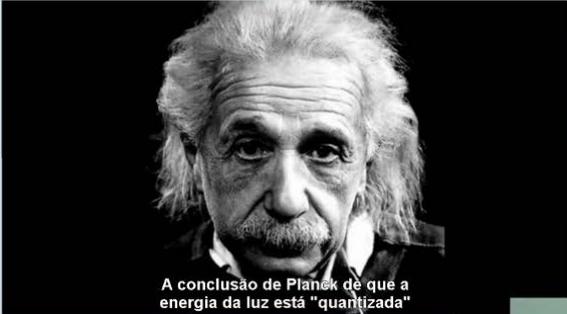
Slide com os recursos da aula 05 – Semana 03

### 3ª Semana: Aula 06

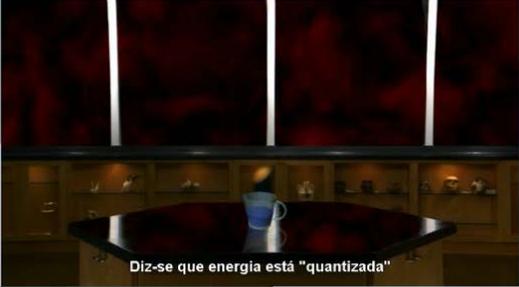
- **Questão Problematizadora:** Mas afinal, o que é a luz? E matéria?
- **Identificar** as **concepções prévias** dos estudantes sobre as propriedades da **luz** e da **matéria**;
- **Reproduzir** alguns documentários para enunciar concepções de alguns cientistas sobre a luz (Organizadores prévios);
- **Diferenciar** as concepções clássicas e as concepções mais modernas sobre a luz (Diferenciação progressiva);
- **Enunciar** o conceito de **fóton** a partir do efeito fotoelétrico de Einstein. (Ideia ancoradora para compreensão dos dispositivos semicondutores);

Slide com a proposta da aula 06 – Semana 03

## DOCUMENTÁRIOS:



A conclusão de Planck de que a energia da luz está "quantizada"



Diz-se que energia está "quantizada"



Daí a produção de corrente elétrica

Slide com os recursos da aula 06 – Semana 03

## 4ª Semana: Aula 07

- **Questão Problematizadora:** O que são níveis de Energia; Onde o elétron pode estar no átomo? Como os elétrons se distribuem num átomo? (Nível um pouco mais aprofundado)
- Identificar as concepções prévias dos estudantes sobre os modelos atômicos;
- **Níveis atômicos** (organizadores prévios para formação de bandas);
- **Diferenciar** os modelos atômicos indicando noções de **quantização** (órbitas e radiação). Diferenciação progressiva.
- **Exibição de vídeo (Organizador Prévio)** sobre modelos atômicos (explicação lúdica) - Tudo se Transforma - História dos Modelos Atômicos on Vimeo.mp4 (14 min);
- **Exibição de vídeo (Organizador prévio):** "Relembrando" os níveis atômicos, camadas e orbitais. (Química 46. Níveis e Subníveis de Energia - YouTube) (11min);
- **Exibição de vídeo:** Sobre níveis, subníveis e orbitais (detalhes dos orbitais); Regiões de maior **probabilidade** para **localizar** o elétron (ORBITAIS AULA I Orbitais Atômicos - YouTube) (4min);
- **Aplicativo "Orbital Viewer":** Representar a probabilidade de localizar elétrons em diversos orbitais. O professor simulará alguns orbitais evidenciando a densidade de probabilidade.

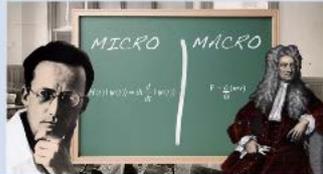
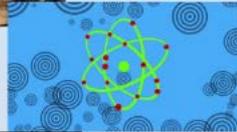
### O que são níveis de energia? Onde o elétron pode estar?

Slide com a proposta da aula 07 – Semana 04

## Vídeo (átomos):

**Título:** "Tudo se transforma -  
História dos Modelos Atômicos

**Tempo:** 15 min



Slide com os recursos da aula 07 – Semana 04

## Recursos:

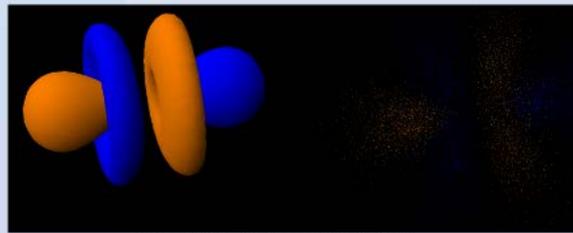


**Vídeo:** Relembrando o modelo de níveis

### Distribuição Eletrônica em Orbitais

Subnível eletrônico	Quantidade de orbitais	Representação
s	1	□
p	3	□ □ □
d	5	← □ □ □ □ □
f	7	

**Vídeo:** Relembrando o modelo de orbitais



**Aplicativo:** Modelo de orbitais.

Slide com os recursos da aula 07 – Semana 04

## 4ª Semana: Aula 08

- **Questão Problematizadora:** O que são as chamadas **Bandas** de Energia que possibilitaram os **saltos dos elétrons** nos materiais semicondutores? Como elas são formadas a partir dos níveis atômicos?
- **Explicar** a Interação e sobreposição dos **estados eletrônicos dos elétrons** na formação dos sólidos cristalinos;
  - A natureza ondulatória dos elétrons nos cristais como característica importante para a formação das bandas de energia;
- **Situações-problema:** Ex.: Mas o que deve ocorrer quando muitos átomos são ligados para formar um sólido? (Levando em conta o conhecimento prévio dos estudantes)
- **Aula expositiva:**
- **Mostrar** combinação dos orbitais ou superposição das funções de onda dos níveis atômicos a partir de algumas simulações. (Conteúdo menos inclusivo - nível maior de complexidade)
  - Slides;
  - Simulações;
- **Caracterizar** o modelo de **Kronig-Penney**.

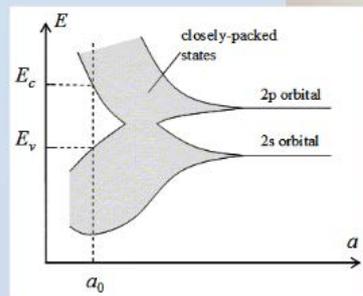
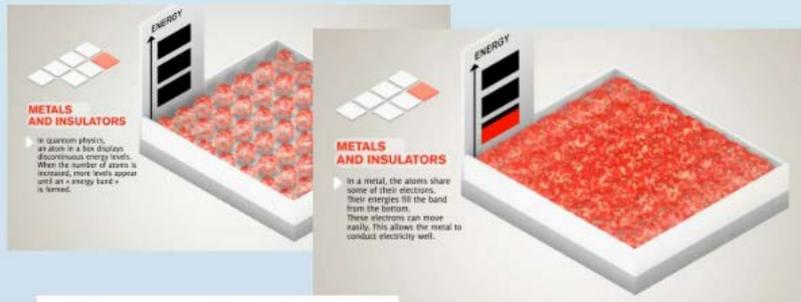
Duas bandas existem, como foi visto após o experimento. Com o modelo atômico atual alguns níveis são possíveis para os elétrons. Como, então, os elétrons se distribuem no átomo? E como são formadas aquelas bandas de energia?

**RETOMAR** os diversos conteúdos estruturantes)

- **Questionário 5** – Nível médio
- **Questionário 6** – Nível médio

Slide com a proposta da aula 08 – Semana 04

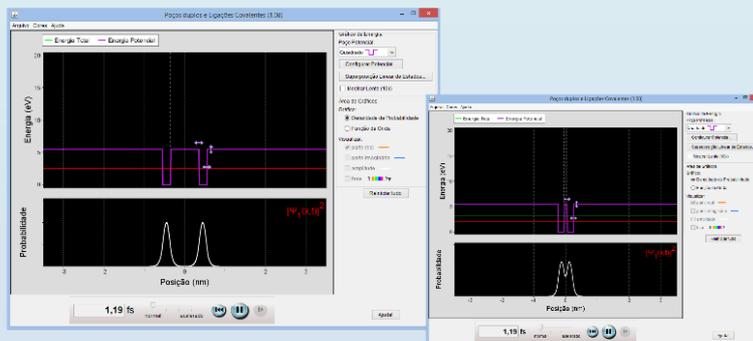
# SIMULAÇÃO:



Formação de bandas

**Simulação** (covalent-bonds\_pt.jar): Mostrar combinação dos orbitais ou superposição das funções de onda de cada nível atômico.

Slide com os recursos da aula 08 – Semana 04



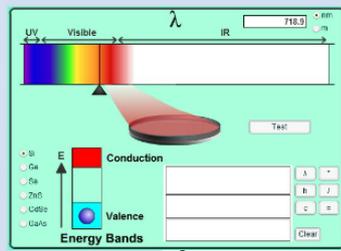
**Simulação** (Eng. Felipe Pinheiro): Formação de bandas a partir do potencial da estrutura cristalina.



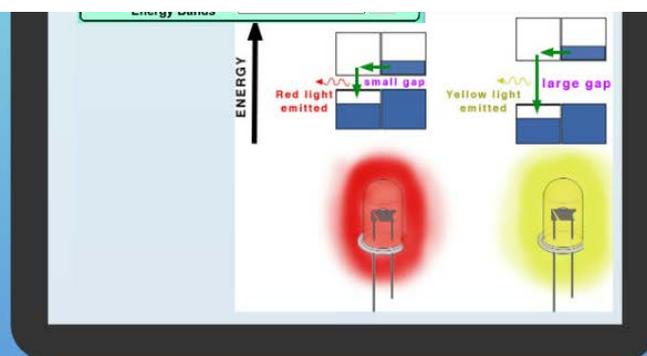
Slide com os recursos da aula 08 – Semana 04

### 5ª Semana: Aula 09

- **Questão Problematizadora:** Qual a importância da banda proibida (GAP energy) nos dispositivos semicondutores?
- Retomar aos saltos quânticos entre bandas de valência e condução buscando descrever o funcionamento dos LEDs e da fotocélula (Reconciliação integradora);
- **Determinar a frequência de luz emitida (LED) e energia necessária para mover elétrons entre bandas (fotocélula) - simulação.**



Slide com a proposta da aula 09 – Semana 05



Retomando Nível Geral: Já sabemos o que são semicondutores, como os átomos fazem suas ligações covalentes; sabemos que os níveis degenerados são desdobrados para formação de bandas. Sabemos diferenciar os condutores, isolantes e semicondutores e como os elétrons podem saltar as bandas. Qual a energia da luz emitida no LED? Que equação é importante para cálculo dos fótons em ambos os experimentos?

Slide com os recursos da aula 09 – Semana 05

## 5ª Semana: Aula 10

**RETOMAR** os diversos conceitos quânticos abordados (retomar os aspectos mais gerais, estruturantes)

- **Questionário 5** – Nível menos inclusivo. OBS: O mesmo Questionário 4.
- **Questionário 6** – Nível menos inclusivo – Avaliação final – somativa – questões de múltipla escolha.
- Construção de um **mapa conceitual** – retomar todos os conceitos abordados (aula extra - cedida por outro professor).
- Sorteio de um kit “robô solar” para um dos alunos da turma.

Slide com a proposta da aula 10 – Semana 05

## APÊNDICE 04: Recursos educacionais usados nas aulas



Robô, Kit Brinquedo Educacional.



Circuito (simples painel solar) para acionar um relógio digital.

## APÊNDICE 05: Telas da Simulação elaborada para a UEPS.



Tela de apresentação do Software.



Tela principal do Software

## ← Créditos

Esse software foi desenvolvido como Trabalho de Conclusão de ...  
da Universidade Estadual de Feira de Santana, curso: Engenharia de Computação

Felipe Pinheiro de Oliveira

Universidade Estadual de Feira de Santana - UEFS

Prof. Gabriela Ribeiro Peixoto Rezende Pinto

Universidade Estadual de Feira de Santana - UEFS

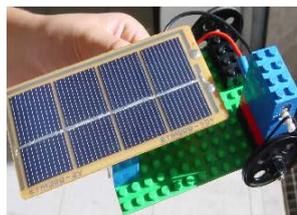
Prof. Antônio Vieira de A. Neto

Universidade Estadual de Feira de Santana - UEFS

Tela de Créditos – colaboradores.

## ← Aplicações

Robótica



FONTE: <http://vssolar.blogspot.com.br/>



Tela com apresentação de algumas aplicações dos painéis solares.

## APÊNDICE 06: Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE)

### TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

Pesquisa: Noções de Física Quântica a partir do estudo do Efeito Fotovoltaico - uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa para 3ª Série do Ensino Médio.

Pesquisador Responsável: Gustavo de Carvalho Campos

Seu filho(a) está sendo convidado(a) para participar, como voluntário(a), em uma pesquisa na escola. A pesquisa trata de ensinar noções da Física Moderna e Contemporânea (FMC) a partir de um Efeito dificilmente ensinado no Ensino Médio – O efeito fotovoltaico. Este efeito é imprescindível nos dias atuais e está presente em diversas tecnologias e somente é explicado com teorias da Física Moderna. O papel do seu filho(a) será de participar das atividades propostas pelo professor-pesquisador participar de aula, responder questionários, produzir mapas conceituais, quando solicitados. Estes documentos não serão divulgados, e serão instrumentos de coleta de dados para o pesquisador. A pesquisa pode gerar algum tipo de constrangimento quando, perante a turma, o(a) participante não conseguir interagir com as atividades propostas durante o processo da pesquisa, mas evitaremos ao máximo esse tipo de constrangimento, pois seu filho(a) não será pressionado a realizar tarefa alguma em nenhum momento da pesquisa, toda participação é voluntária! Em compensação seu filho(a) terá o benefício de conhecer noções da Física desenvolvida a partir do Século XX. Você poderá aceitar ou não a participação do seu filho. Em caso de recusa seu filho não será penalizado(a) de forma alguma. Aceitando você também poderá retirar seu consentimento a qualquer momento sem penalidades. A pesquisa não irá interferir no desempenho escolar do seu filho(a). Você não terá nenhuma despesa, todo material necessário para a pesquisa será fornecida pelo professor-pesquisador. Desde já fica garantido o anonimato e o sigilo da sua participação, pois não constará o seu nome nos documentos de coletas de dados da pesquisa. Seu filho poderá ser retratado com um falso nome, durante a pesquisa. Em caso de despesas e/ou danos, causados comprovadamente pela pesquisa, você será ressarcido e/ou indenizado pelo pesquisador. Nosso interesse é fornecer uma educação científica de qualidade. Você pode tirar qualquer dúvida durante e depois da pesquisa nos seguintes endereços: Universidade Estadual de Feira de Santana (Módulo 4, LABOFIS) - Avenida Transnordestina, s/n - Novo Horizonte, UEFS – CEP: 44.031-460 – Tel.: (75) 3224-8124. Ou ainda pelo contato do Comitê de Ética em Pesquisa, (75)-3161-8067/ [cep@uefs.br](mailto:cep@uefs.br), para dúvidas em relação ao ponto de vista ético da pesquisa. Caso você permita que seu filho(a) participe da pesquisa, solicitamos permissão para divulgar a pesquisa em revistas e artigos. Também garantimos que, ao fim da pesquisa, apresentaremos os resultados na escola em forma de seminário. Esse termo possui duas vias que devem ser assinadas, se for autorizada a participação do seu filho na pesquisa, sendo uma via do professor pesquisador e outra sua.

\_\_\_\_\_  
Gustavo de Carvalho Campos  
Pesquisador responsável

Nome do(a) estudante: \_\_\_\_\_.

Nome do responsável: \_\_\_\_\_.

Local e data: \_\_\_\_\_.

Assinatura do responsável: \_\_\_\_\_.

## APÊNDICE 07: Termo de Assentimento Livre e Esclarecido (TALE)

### TERMO DE ASSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

Você está sendo convidado (a) por seu professor de física, para participar como voluntário de uma pesquisa na sua escola. Sua participação é importante para que seja possível analisarmos seu aprendizado acerca de alguns conceitos da Física Moderna. Seu papel será de participar das atividades propostas pelo professor-pesquisador, participar de aulas, responder questionários, produzir mapas conceituais, quando solicitados, que servirão para análise do pesquisador. Todo material necessário será fornecida pelo professor-pesquisador. Em caso de despesas e/ou danos, causados comprovadamente pela pesquisa, você será ressarcido e/ou indenizado. Você poderá participar ou não, só depende de você. Desde já fica garantido o anonimato quando houver a divulgação da pesquisa, ou seja, não revelaremos seu nome. Em caso de recusa, ou caso você, em algum momento, se sentir desconfortável com qualquer procedimento da pesquisa, poderá pedir para parar e não será penalizado (a) de forma alguma. Você também poderá retirar seu consentimento a qualquer momento sem penalidades. Sua participação não irá interferir no andamento do curso da disciplina e não serão atribuídas notas para as atividades solicitadas durante a pesquisa. Após a realização da pesquisa, poderá pedir para o seu responsável que tire ou coloque qualquer informação que você quiser. O material ficará com a gente em uma sala da UEFS, por cinco anos. Se durante a pesquisa você sentir alguma dúvida, pode perguntar que a gente terá o maior prazer de responder. Este é o endereço para que possa entrar em contato: Universidade Estadual de Feira de Santana (Módulo 4, LABOFIS) - Avenida Transnordestina, s/n - Novo Horizonte, UEFS – CEP: 44.031-460 – Tel.: (75) 3224-8124. Ao fim da pesquisa será elaborado um documento acadêmico chamado dissertação onde divulgaremos os resultados obtidos. A pesquisa também poderá ser divulgada em revistas e artigos. Na escola, ao fim da pesquisa, faremos um seminário para tornar conhecido os resultados da pesquisa.

Esse termo possui duas vias que devem ser assinadas, caso você aceite a participar da pesquisa, sendo uma via do professor pesquisador e outra sua.

---

Gustavo de Carvalho Campos  
Professor Pesquisador

Nome do(a) estudante: \_\_\_\_\_.

Local e data: \_\_\_\_\_.

Assinatura do(a) estudante: \_\_\_\_\_.

## APÊNDICE 08: Questionário 1



### Questionário para os alunos – Etapa 1 – Mais geral e inclusivo.

O objetivo deste questionário é verificar o conhecimento sobre a Luz e Transformações de Energia.

**Orientações:** O preenchimento deste questionário é voluntário. Leia atentamente as orientações para responder ao questionário corretamente. Em questões abertas responda no espaço determinado ou no verso da folha.

Assinale com um X na alternativa correta das questões de múltipla escolha. Qualquer dúvida no preenchimento das questões pergunte ao professor.

**Idade:** \_\_\_\_ anos

**Série:** \_\_\_\_\_

1. Para você, o que é a luz?

---

---

---

2. O sol é uma estrela que tem muita energia e emite luz própria. Cite alguns dispositivos que emitem luz.

---

---

3. Explique algumas formas de gerar luz (obtenção de energia luminosa) a partir da energia elétrica (eletricidade).

---

---

---

---

4. Como é gerada a energia elétrica que é consumida em nossas casas?

---

---

---

---



5. É possível produzir energia elétrica a partir da luz? De que forma?

---

---

---

6. Você conhece algum dispositivo que funcione convertendo a energia proveniente da luz em energia elétrica? Qual?

---

---

---

7. Como estes dispositivos (referente à questão 6) poderiam ser úteis em nossa vida diária?

---

---

---

8. Você sabe de que material são feitos estes dispositivos (referente à questão 6)?

---

---

---

**Espaço reservado para completar respostas:**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## APÊNDICE 09: Questionário 2



### Questionário para os alunos – Etapa 2 – Após a hipermídia.

O objetivo deste questionário é verificar o que se compreende sobre os semicondutores após a exibição da hipermídia.

**Orientações:** O preenchimento deste questionário é voluntário. Leia atentamente as orientações para responder ao questionário corretamente. Em questões abertas responda no espaço determinado ou no verso da folha.

Assinale com um X na alternativa correta das questões de múltipla escolha. Qualquer dúvida no preenchimento das questões pergunte ao professor.

**Idade:** \_\_\_\_ anos

**Série:** \_\_\_\_\_

1. O que são semicondutores?

---

---

---

2. Cite dois átomos constituintes de materiais semicondutores.

---

---

---

3. Como são as ligações entre dois átomos de silício? Represente a ligação entre estes átomos?

---

---

---

4. O que é corrente intrínseca?

---

---

---

5. O que são lacunas (ou buracos)? Porque as lacunas podem ser consideradas "cargas positivas"?

---

---

---

---



6. Como mais elétrons podem ser removidos e deslocados nas ligações covalentes?

---

---

---

7. O que você entende por retículo cristalino formado por átomos de Si, por exemplo?

---

---

---

8. Para que serve a dopagem nos átomos de silício?

---

---

---

9. Diferencie um material semiconductor tipo p e tipo n.

---

---

---

10. Qual a função da junção PN no caso dos diodos?

---

---

---

**Espaço reservado para completar respostas:**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## APÊNDICE 10: Atividades experimentais propostas para a aula 03

### Experimento 01: Construção de circuitos simples com LEDs.

#### 1. Objetivos:

Esta aula prática tem como objetivo promover a familiarização dos alunos com dispositivos eletroeletrônicos e outros elementos usados em circuitos elétricos e instrumentos de medida. Compreensão do funcionamento de circuitos simples com a utilização de semicondutores.

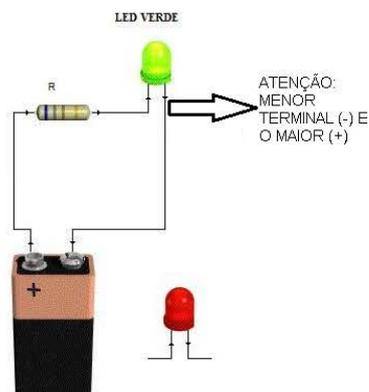
#### 2. Material utilizado:

- 2 ou 3 diferentes tipos de LEDs;
- Multímetro;
- Ferro de Solda;
- Estranho;
- Pilhas 3V ou 9V;
- Resistores;
- Cabos;
- Fios;

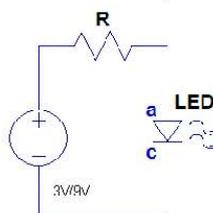
#### 3. Conduta no laboratório:

- Ao término de todas as aulas:
  - Desligue todos os equipamentos utilizados.
  - Mantenha a bancada limpa.
  - Devolva todos os componentes usados na prática para o professor.
  - Não coma nem beba durante a realização da prática.
  - Em caso de dúvida, consulte sempre o professor ou monitor antes de executar qualquer tarefa.

#### 4. Montagem do circuito.



- Para cada LED disponibilizado, construa o seguinte circuito;
- Fazer as medições necessárias com o professor durante a realização dos experimentos.



## Experimento 02: Construção de uma simples “célula solar”.

### 1. Objetivos:

Esta aula prática tem como objetivo promover a familiarização dos alunos com dispositivos eletroeletrônicos e outros elementos usados em circuitos elétricos e instrumentos de medida. Compreensão do funcionamento de circuitos simples com a utilização de semicondutores.

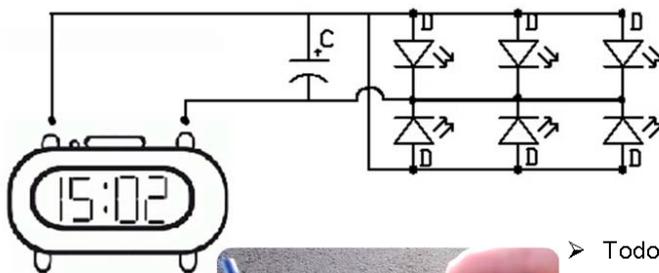
### 2. Material utilizado:

- 6 Fotodiodos (emissão de luz vermelha);
- Multímetro;
- Ferro de Solda;
- Estranho;
- Um relógio digital sem a pilha;
- Capacitor de  $10\mu\text{F}/63\text{V}$ ;
- Fios;

### 3. Conduta no laboratório:

- Ao término de todas as aulas:
  - Desligue todos os equipamentos utilizados.
  - Mantenha a bancada limpa.
  - Devolva todos os componentes usados na prática para o professor.
  - Não coma nem beba durante a realização da prática.
  - Em caso de dúvida, consulte sempre o professor ou monitor antes de executar qualquer tarefa.

### 4. Montagem do circuito.



- Todos os Fotodiodos devem estar em Paralelo no circuito.
- As polaridades do capacitor e dos Fotodiodos devem ser compatíveis. (Ver com o professor)





**Questionário para os alunos – Etapa 3 – Após a realização dos experimentos.**

O objetivo deste questionário é verificar o que se compreende sobre os dispositivos semicondutores e transformações de energia após a exibição a realização de experimentos.

**Orientações:** O preenchimento deste questionário é voluntário. Leia atentamente as orientações para responder ao questionário corretamente. Em questões abertas responda no espaço determinado ou no verso da folha.

Assinale com um X na alternativa correta das questões de múltipla escolha. Qualquer dúvida no preenchimento das questões pergunte a pessoa que aplicou o teste.

Idade: \_\_\_\_ anos

Série: \_\_\_\_\_

**( ) Experimento 2 – Construção de circuitos com Fotodiodos para ligar um relógio digital:**

1. Que tipos de energias se manifestam neste experimento realizado?
2. Como ocorrem as conversões de energias?
3. Como o relógio pôde funcionar através da incidência da luz em Fotodiodos?
4. Qual a relação que deve existir entre este experimento e o funcionamento do "Kit solar" mostrado na primeira aula?

**Espaço reservado para respostas (favor enumerá-las):**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## APÊNDICE 12: Questionário 4



### Questionário para os alunos – Etapa 4 – Menos inclusivo.

O objetivo deste questionário é avaliar a compreensão de alguns conceitos mais específicos já trabalhados em sala e avaliar aspectos gerais dos semicondutores.

**Orientações:** O preenchimento deste questionário é voluntário. Leia atentamente as orientações para responder ao questionário corretamente. Em questões abertas responda no espaço determinado ou no verso da folha.

Assinale com um X na alternativa correta das questões de múltipla escolha. Qualquer dúvida no preenchimento das questões pergunte a pessoa que aplicou o teste.

**Idade:** \_\_\_\_ anos

**Série:** \_\_\_\_\_

1. Quanto à capacidade de conduzir eletricidade, como os materiais são classificados?

---

---

---

2. Como você descreve estes materiais a nível atômico?

---

---

---

3. Como estão distribuídos os elétrons num átomo?

---

---

---

4. Discuta por que, quando um grande número de átomos se agrupa para formar um sólido macroscópico, os níveis de energia passam a formar bandas de energia ao invés de permanecer discretizados.

---

---

---

---



**5.** Diferencie bandas de energia e níveis de energia dos elétrons. Em qual deles (bandas ou níveis) deve haver maior probabilidade de encontrar elétrons?

---

---

---

**6.** Os semicondutores promoveram uma verdadeira revolução na eletrônica. Os chips de computadores são feitos deste tipo de material. O que são semicondutores?

- a) São materiais que não oferecem resistência à passagem de corrente elétrica.
- b) São os materiais de mais alta condutividade.
- c) São os materiais de mais alta resistividade.
- d) São materiais cujo valor da resistividade é intermediário entre os valores das resistividades dos isolantes e dos condutores.

**7.** Condução em semicondutores não só depende do movimento dos elétrons, mas também depende do movimento de algo chamado "buracos". Como você define buracos ou lacunas em semicondutores?

---

---

---

---

**8.** Como pode ser entendido o movimento de buracos ou lacunas através do material?

---

---

---

---

**9.** Explique, em termos de movimento de elétrons, por que um diodo emissor de luz (LED) não pode ser feito a partir da junção de material semicondutor puro (um semicondutor não-dopado).

---

---

---

**10.** No processo de geração de eletricidade a partir da luz, no material semicondutor:

- a) aparece par elétron-buraco no semicondutor.
- b) uma lacuna aparece e desaparece um elétron livre.
- c) aparecem mais elétrons livres que buracos.

## APÊNDICE 13: Questionário 5



### Questionário para os alunos – Etapa 5 – Menos inclusivo – Avaliação Final.

O objetivo deste questionário é avaliar a compreensão de alguns conceitos mais específicos já trabalhados em sala e avaliar aspectos gerais dos semicondutores.

**Orientações:** O preenchimento deste questionário é voluntário. Leia atentamente as orientações para responder ao questionário corretamente. Em questões abertas responda no espaço determinado ou no verso da folha.

Assinale com um X na alternativa correta das questões de múltipla escolha. Qualquer dúvida no preenchimento das questões pergunte a pessoa que aplicou o teste.

**Idade:** \_\_\_\_ anos

**Série:** \_\_\_\_\_

1. Quanto à capacidade de conduzir eletricidade, como os materiais são classificados?

---

---

---

2. Como você descreve estes materiais a nível atômico?

---

---

---

3. Como estão distribuídos os elétrons num átomo?

---

---

---

4. Discuta por que, quando um grande número de átomos se agrupa para formar um sólido macroscópico, os níveis de energia passam a formar bandas de energia ao invés de permanecer discretizados.

---

---

---

---



**5.** Diferencie bandas de energia e níveis de energia dos elétrons. Em qual deles (bandas ou níveis) deve haver maior probabilidade de encontrar elétrons?

---

---

---

**6.** Os semicondutores promoveram uma verdadeira revolução na eletrônica. Os chips de computadores são feitos deste tipo de material. O que são semicondutores?

- a) São materiais que não oferecem resistência à passagem de corrente elétrica.
- b) São os materiais de mais alta condutividade.
- c) São os materiais de mais alta resistividade.
- d) São materiais cujo valor da resistividade é intermediário entre os valores das resistividades dos isolantes e dos condutores.

**7.** Condução em semicondutores não só depende do movimento dos elétrons, mas também depende do movimento de algo chamado "buracos". Como você define buracos ou lacunas em semicondutores?

---

---

---

---

**8.** Como pode ser entendido o movimento de buracos ou lacunas através do material?

---

---

---

---

**9.** Explique, em termos de movimento de elétrons, por que um diodo emissor de luz (LED) não pode ser feito a partir da junção de material semicondutor puro (um semicondutor não-dopado).

---

---

---

**10.** No processo de geração de eletricidade a partir da luz, no material semicondutor:

- a) aparece par elétron-buraco no semicondutor.
- b) uma lacuna aparece e desaparece um elétron livre.
- c) aparecem mais elétrons livres que buracos.

## APÊNDICE 14: Questionário 6



### Questionário para os alunos – Etapa 6 – Avaliação final.

O objetivo deste questionário é avaliar o aprendizado dos conceitos físicos que possibilitaram a compreensão dos experimentos realizados em sala.

**Orientações:** O preenchimento deste questionário é voluntário. Leia atentamente as orientações para responder ao questionário corretamente. Em questões abertas responda no espaço determinado ou no verso da folha.

Assinale com um X na alternativa correta das questões de múltipla escolha. Qualquer dúvida no preenchimento das questões pergunte ao professor.

**Idade:** \_\_\_\_anos

**Série:** \_\_\_\_\_

**1. (UNIFRA-2010)** A energia solar é hoje uma alternativa para as energias oriundas de combustíveis fósseis, sendo caracterizada por ser uma energia com baixa emissão de poluentes, denominada energia limpa. Em uma residência, o aproveitamento de energia solar para iluminação da iluminação com lâmpadas permite uma redução substancial do consumo de energia da rede elétrica da concessionária. Para captação de energia solar, podem ser utilizadas células fotovoltaicas compostas de materiais semicondutores. Nesse caso, a energia, captada pela célula fotovoltaica e convertida em energia elétrica, é

- a) térmica.
- b) química.
- c) eletromagnética.
- d) mecânica.
- e) nuclear.

**2. (UNEB-BA)** De acordo com o físico Max Planck, que introduziu o conceito de energia quantizada, a luz, elemento imprescindível para manutenção da vida na Terra, como toda radiação eletromagnética, é constituída por pacotes de energia denominados:

- 01) bárions.
- 02) dipolos.
- 03) íons.
- 04) pulsos.
- 05) fótons.

**3. (PUC-RS)** Um átomo excitado emite energia, muitas vezes em forma de luz visível, porque:

- a) um de seus elétrons foi arrancado do átomo.
- b) um dos elétrons desloca-se para níveis de energia mais baixos, aproximando-se do núcleo.
- c) um dos elétrons desloca-se para níveis de energia mais altos, afastando-se do núcleo.
- d) os elétrons permanecem estacionários em seus níveis de energia.
- e) os elétrons se transformam em luz, segundo Einstein



**4. (PUC-MG)** Escolha, entre os modelos atômicos citados nas opções, aquele (aqueles) que, na sua descrição, incluiu (incluíram) o conceito de fóton:

- a) Modelo atômico de Thomson.
- b) Modelo atômico de Rutherford.
- c) Modelo atômico de Bohr.
- d) Modelos atômicos de Rutherford e de Bohr.
- e) Modelos atômicos de Thomson e de Rutherford

**5. (PUC-RS-2003)** O Grupo de Energia Solar da Faculdade de Física da PUCRS realiza pesquisas na área de conversão fotovoltaica de energia. A célula fotovoltaica de maior rendimento já produzida no Brasil, até hoje, foi projetada e construída por esse grupo. O efeito fotovoltaico que ocorre num semicondutor sólido, quando sobre este incide energia eletromagnética, consiste no aparecimento de uma:

- a) corrente elétrica, quando o semicondutor for do tipo N.
- b) corrente elétrica, quando o semicondutor for do tipo P.
- c) diferença de potencial, quando o semicondutor for do tipo N.
- d) corrente elétrica, quando o semicondutor tiver uma junção NN.
- e) diferença de potencial, quando o semicondutor tiver uma junção PN.

**6. (PUC-RS)** Na fabricação de um material semicondutor tipo N, emprega-se silício (tetraivalente) dopado com uma substância que, na sua camada mais externa, tem quantidade de elétrons igual a

- a) 1
- b) 2
- c) 3
- d) 4
- e) 5

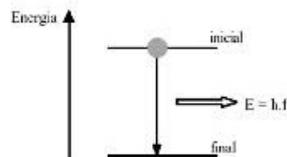
**7. (UEL-PR-2005)** Alguns semicondutores emissores de luz, mais conhecidos como LEDs, estão sendo introduzidos na sinalização de trânsito das principais cidades do mundo. Isto se deve ao tempo de vida muito maior e ao baixo consumo de energia elétrica dos LEDs em comparação com as lâmpadas incandescentes, que têm sido utilizadas para esse fim. A luz emitida por um semicondutor é proveniente de um processo físico, onde um elétron excitado para a banda de condução do semicondutor decai para a banda de valência, emitindo um fóton de energia  $E=h.f$ . Nesta relação,  $h$  é a constante de Planck,  $f$  é a frequência da luz emitida ( $f=c/\lambda$ , onde  $c$  é a velocidade da luz e  $\lambda$  o seu comprimento de onda), e  $E$  equivale à diferença em energia entre o fundo da banda de condução e o topo da banda de valência, conhecida como energia de "gap" do semicondutor. Com base nessas informações e no conhecimento sobre o espectro eletromagnético, é correto afirmar:

- a) A energia de "gap" de um semicondutor será maior quanto maior for o comprimento de onda da luz emitida por ele.
- b) Para que um semicondutor emita luz verde, ele deve ter uma energia de "gap" maior que um semicondutor que emite luz vermelha.
- c) O semicondutor que emite luz vermelha tem uma energia de "gap" cujo valor é intermediário às energias de "gap" dos semicondutores que emitem luz verde e amarela.
- d) A energia de "gap" de um semicondutor será menor quanto menor for o comprimento de onda da luz emitida por ele.
- e) O semicondutor emissor de luz amarela tem energia de "gap" menor que o semicondutor emissor de luz vermelha.



8. O *gap* entre uma banda de valência e uma banda de condução em um semicondutor terá um valor
- a) maior que o de um isolante.
  - b) menor que o de um condutor.
  - c) tanto maior quanto menor que o de um condutor.
  - d) menor que o de um isolante.
  - e) determinado de acordo com o material, podendo ser maior ou menor que o de um isolante.

9. (Uniupe-2003) Considere dois níveis de energia de um átomo de sódio, representados no diagrama abaixo.



A diferença de energia entre os níveis (inicial e final) é igual a  $3,4 \times 10^{-19} \text{J}$  e a energia do fóton é igual a  $h.f$ , em que  $h$  é a constante de Planck ( $6,6 \times 10^{-34} \text{ J.s}$ ) e  $f$  é a frequência do fóton emitido. Considerando os dados apresentados e utilizando a tabela abaixo como referência marque a alternativa, que representa a cor da luz emitida nessa transição eletrônica.

LUZ	COMPRIMENTO DE ONDA ( $10^{-7} \text{m}$ )	FREQUENCIA ( $10^{14} \text{hz}$ )
Violeta	4,0 a 4,5	6,7 a 7,5
Anil	4,5 a 5,0	6,0 a 6,7
Azul	5,0 a 5,3	5,7 a 6,0
Verde	5,3 a 5,7	5,3 a 5,7
Amarela	5,7 a 5,9	5,0 a 5,3
Alaranjada	5,9 a 6,2	4,8 a 5,0
Vermelha	6,2 a 7,5	4,0 a 4,8

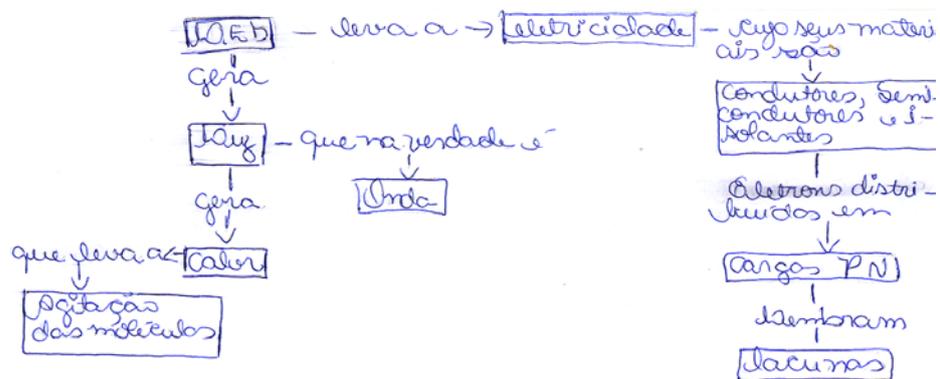
- a) vermelha.
- b) amarela.
- c) violeta.
- d) azul.
- e) verde.

10. (UFMG-2007) Nos diodos emissores de luz, conhecidos como LEDs, a emissão de luz ocorre quando elétrons passam de um nível de maior energia para um outro de menor energia. Dois tipos comuns de LEDs são o que emite luz vermelha e o que emite luz verde. Sejam  $\lambda_{\text{verde}}$  o comprimento de onda da luz emitida pelo LED verde e  $E_{\text{verde}}$  a diferença de energia entre os níveis desse mesmo LED. Para o LED vermelho, essas grandezas são, respectivamente,  $\lambda_{\text{vermelho}}$  e  $E_{\text{vermelho}}$ .

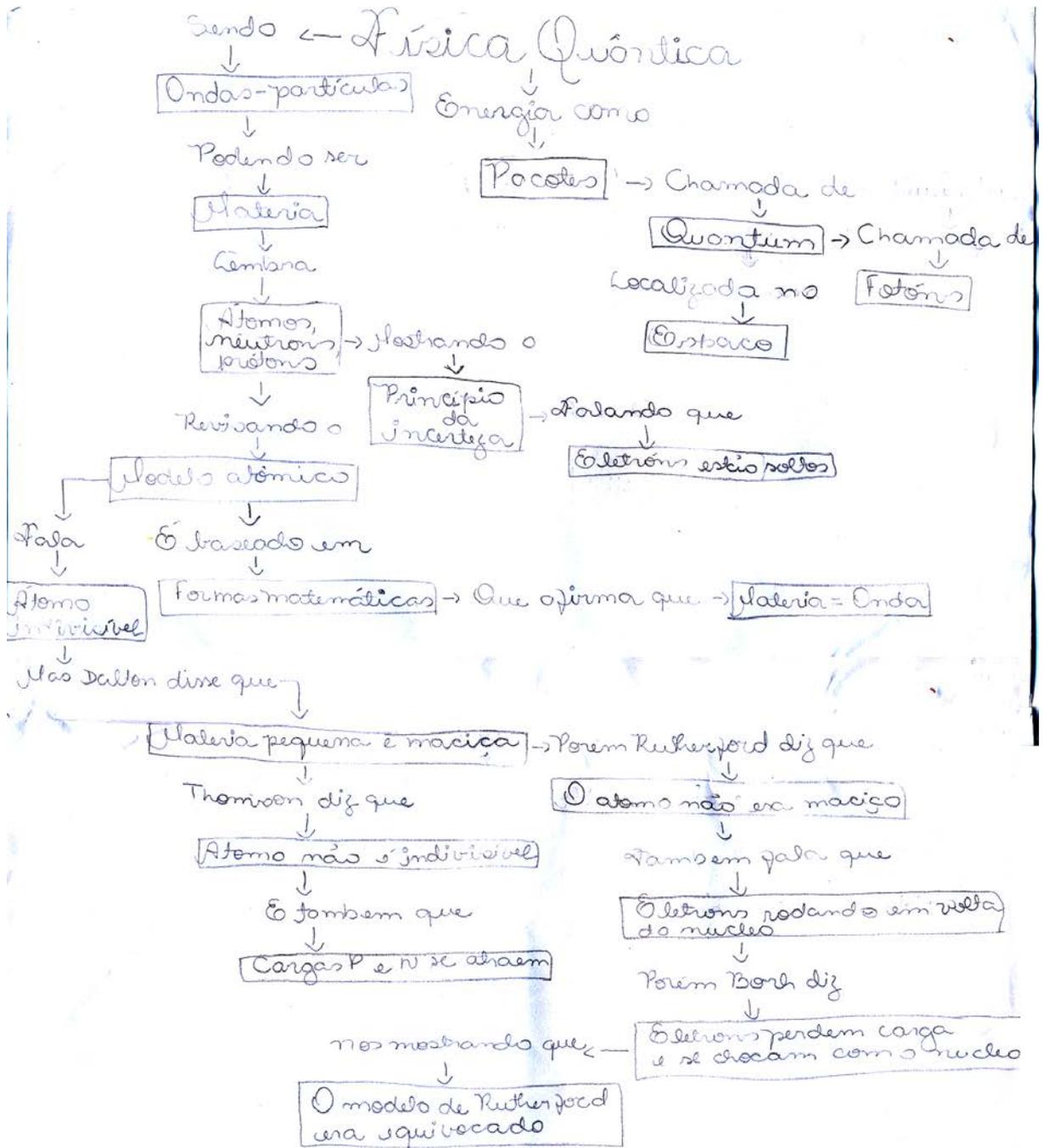
Considerando-se essas informações, é CORRETO afirmar que

- a)  $E_{\text{verde}} > E_{\text{vermelho}}$  e  $\lambda_{\text{verde}} > \lambda_{\text{vermelho}}$
- b)  $E_{\text{verde}} > E_{\text{vermelho}}$  e  $\lambda_{\text{verde}} < \lambda_{\text{vermelho}}$
- c)  $E_{\text{verde}} < E_{\text{vermelho}}$  e  $\lambda_{\text{verde}} > \lambda_{\text{vermelho}}$
- d)  $E_{\text{verde}} < E_{\text{vermelho}}$  e  $\lambda_{\text{verde}} < \lambda_{\text{vermelho}}$

## APÊNDICE 15: Mapas conceituais dos estudantes

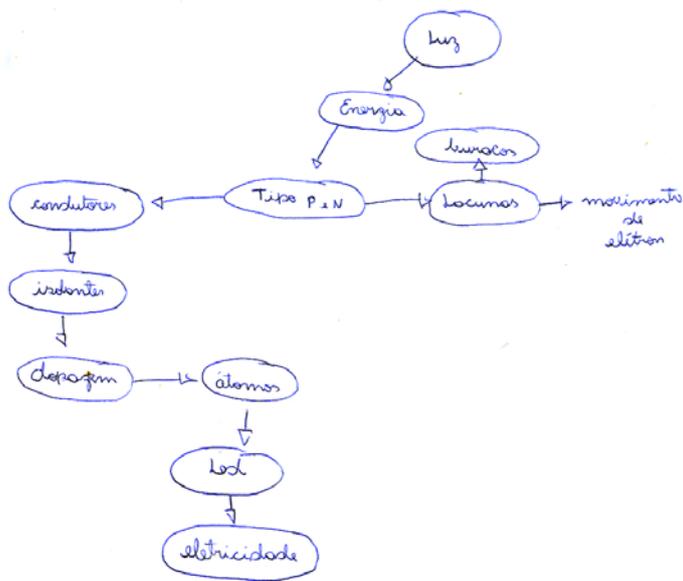


Primeira versão de mapa conceitual elaborado pelo Estudante 02.

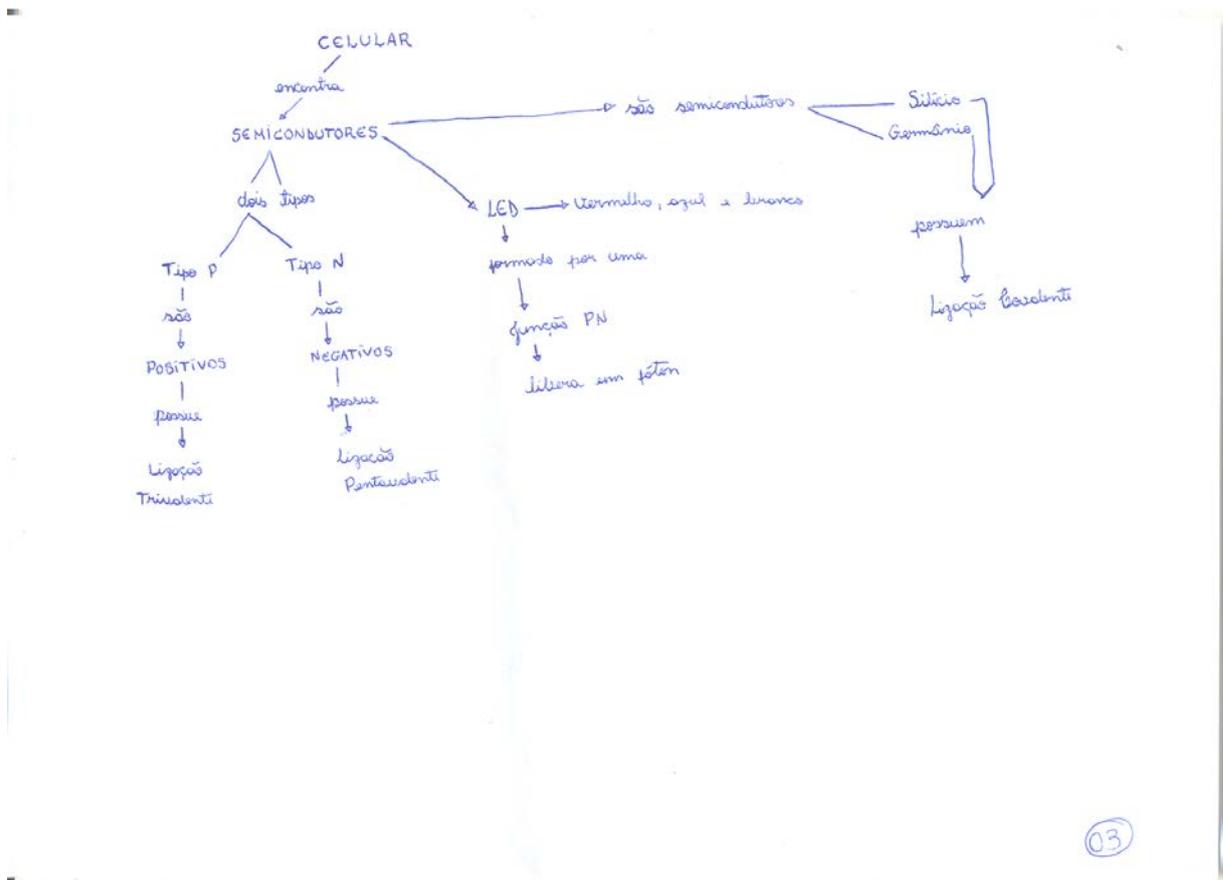


02

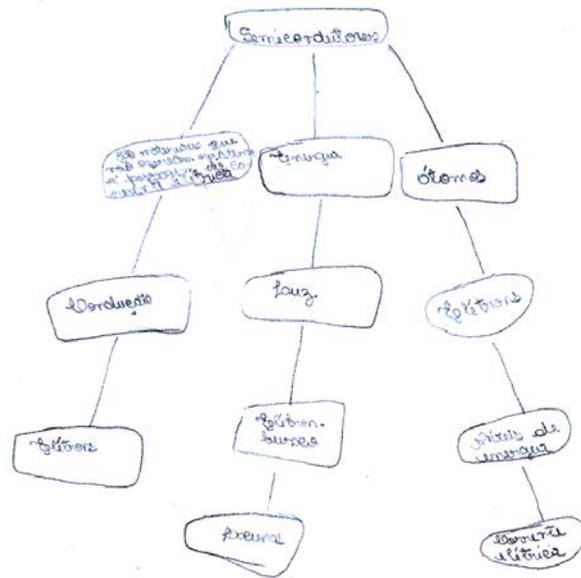
Segunda versão de mapa conceitual elaborado pelo Estudante 02.



Primeira versão de mapa conceitual elaborado pelo Estudante 03.



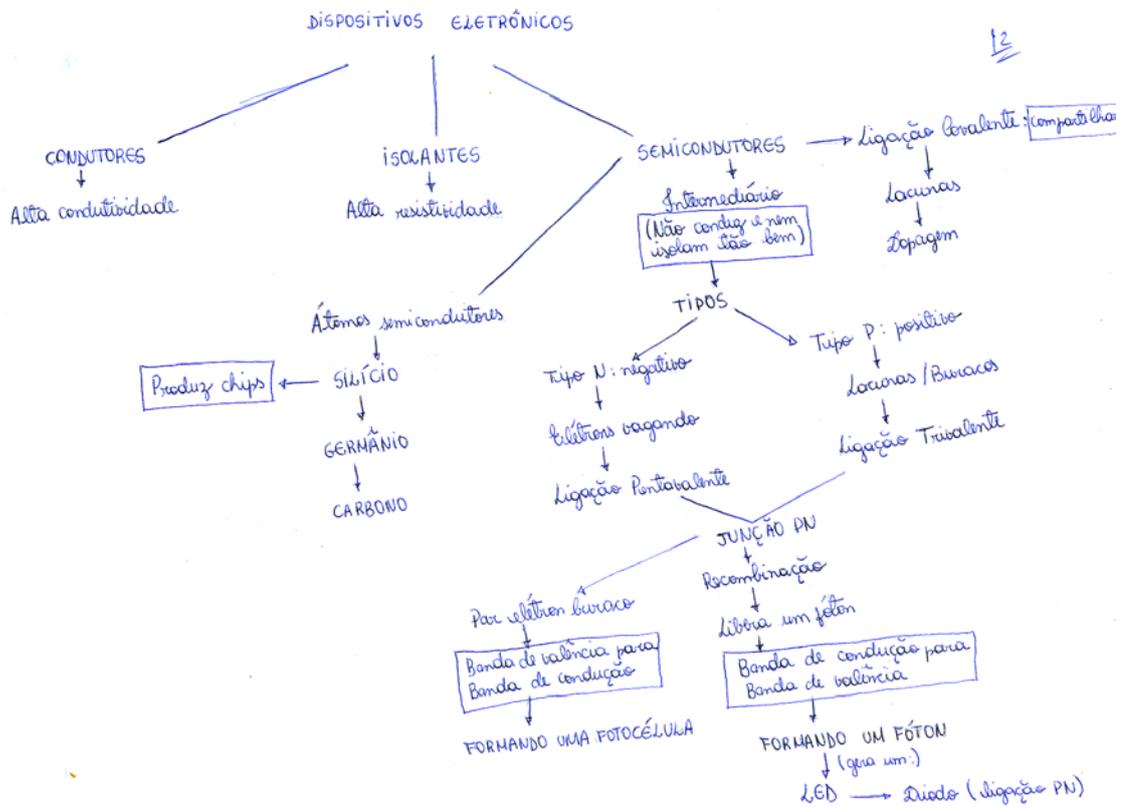
Segunda versão de mapa conceitual elaborado pelo Estudante 03.



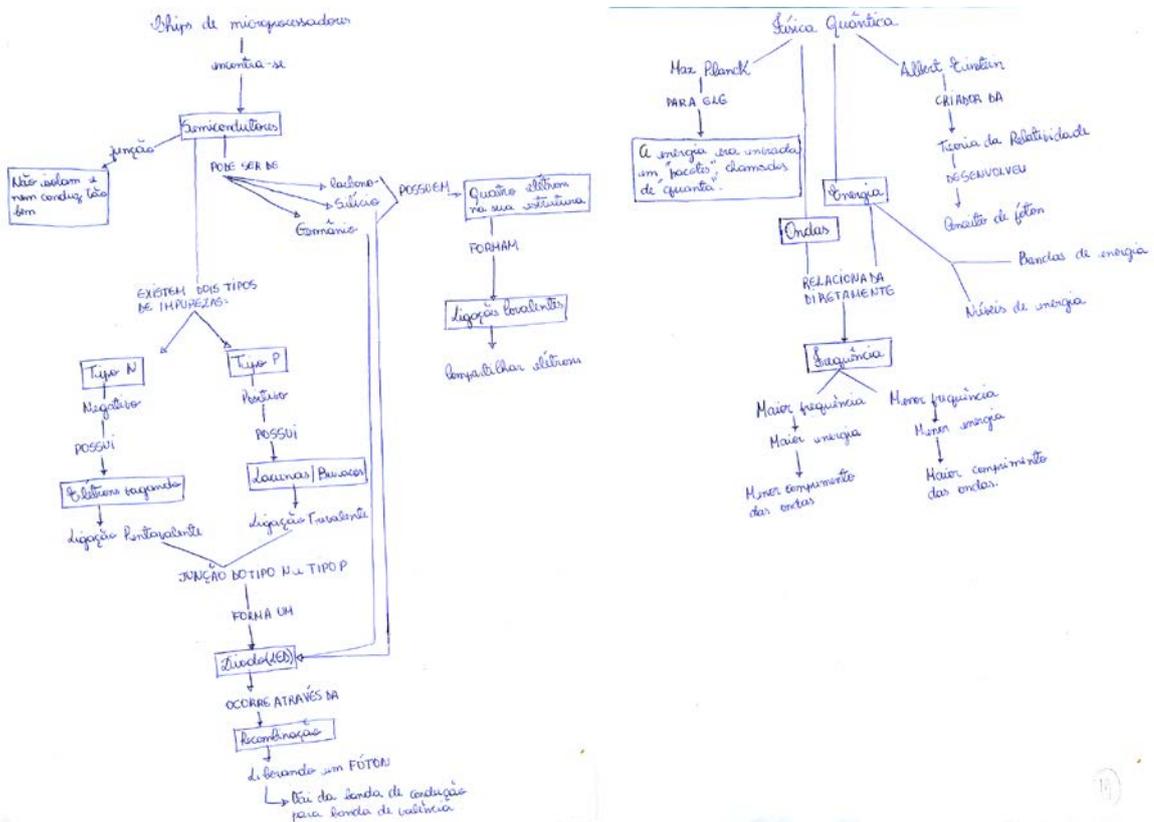
05

Primeira versão de mapa conceitual elaborado pelo Estudante 05.

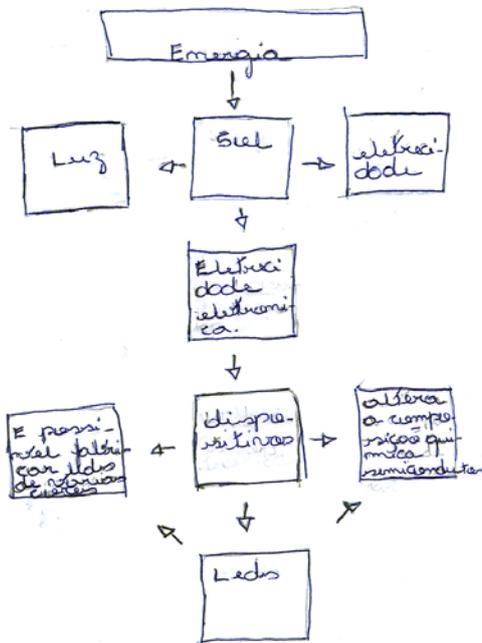




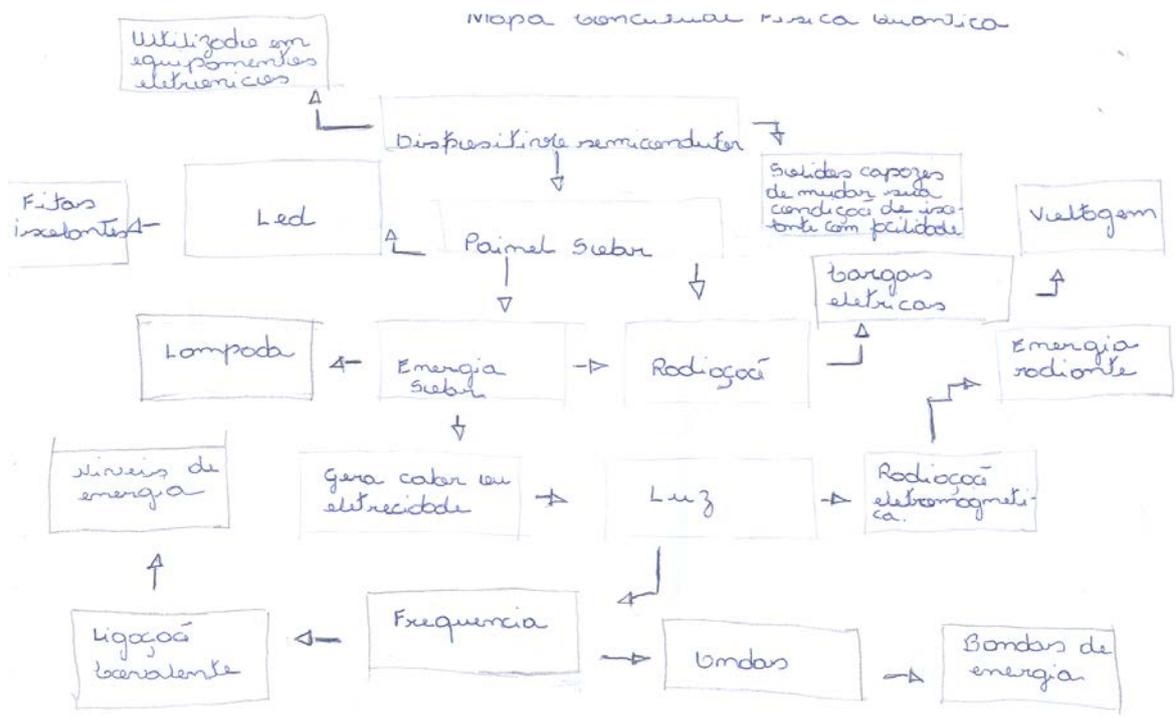
Primeira versão de mapa conceitual elaborado pelo Estudante 12.



Segunda versão de mapa conceitual elaborado pelo Estudante 12.

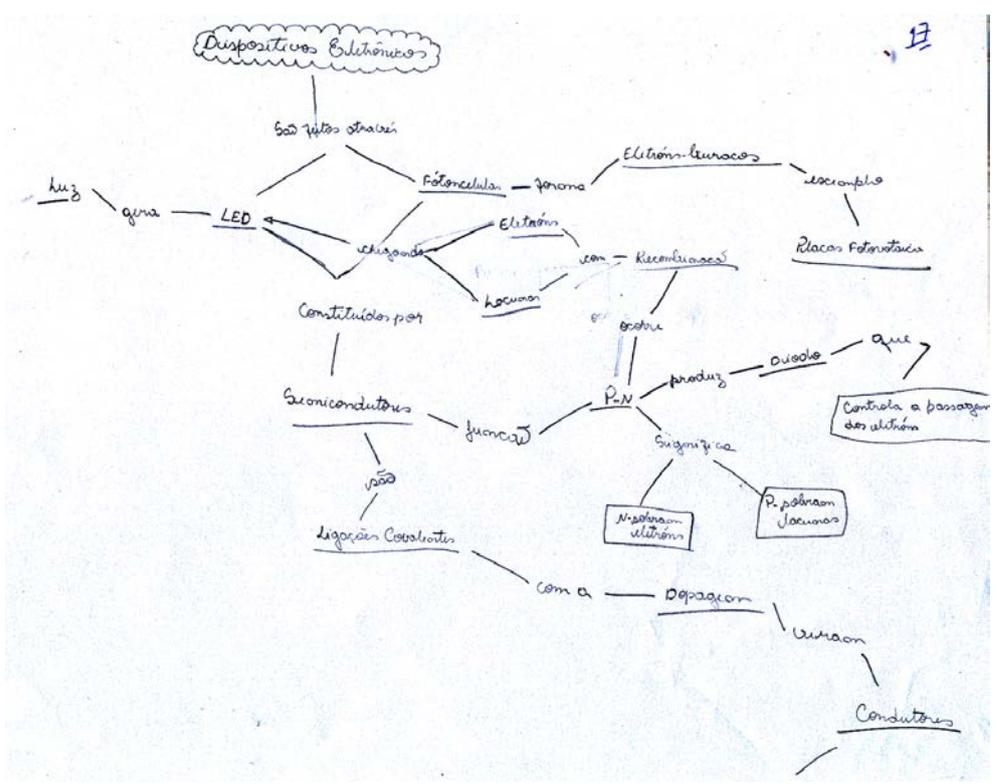


Primeira versão de mapa conceitual elaborado pelo Estudante 13.



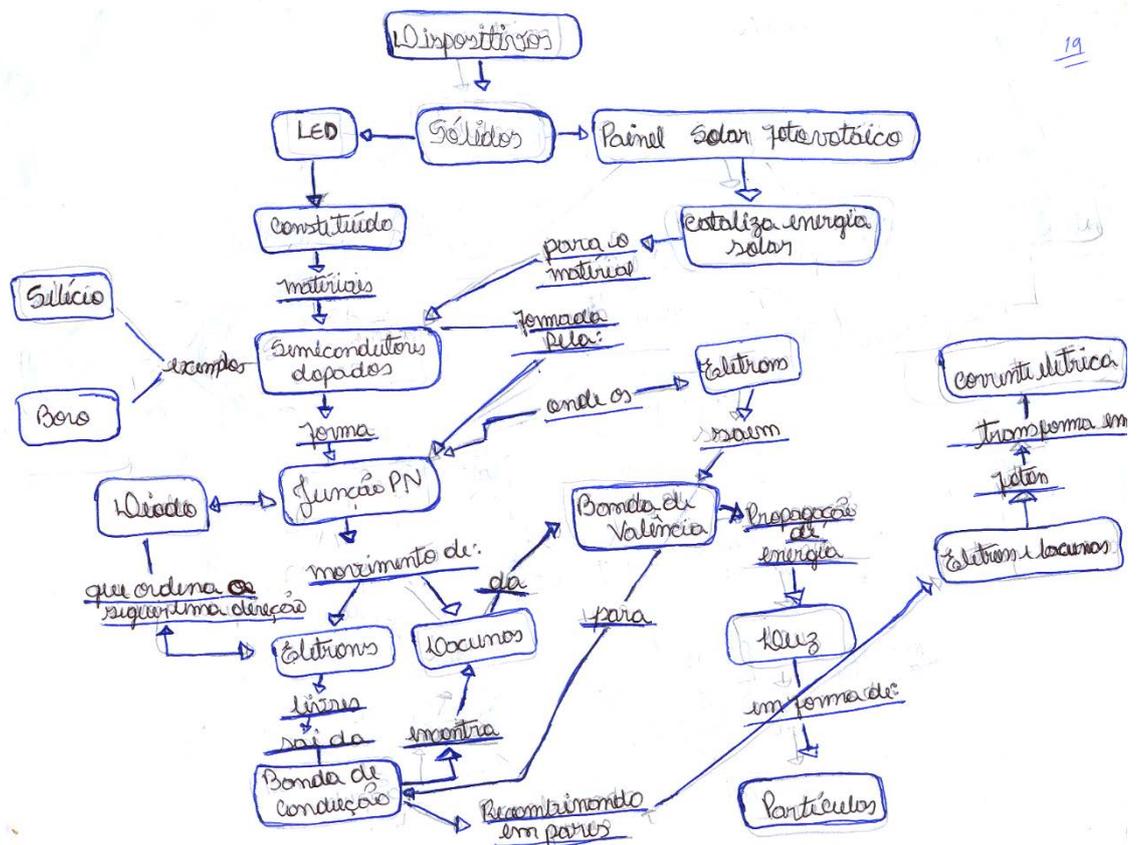
13

Segunda versão de mapa conceitual elaborado pelo Estudante 13.



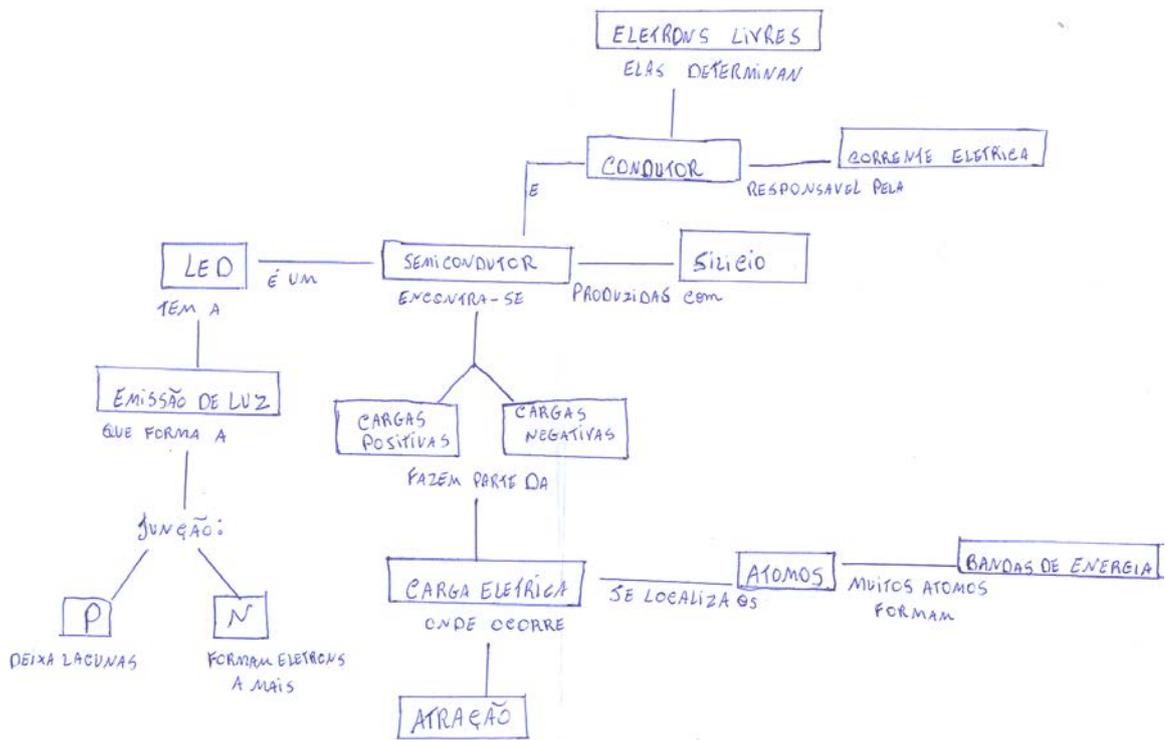
Primeira versão de mapa conceitual elaborado pelo Estudante 17.





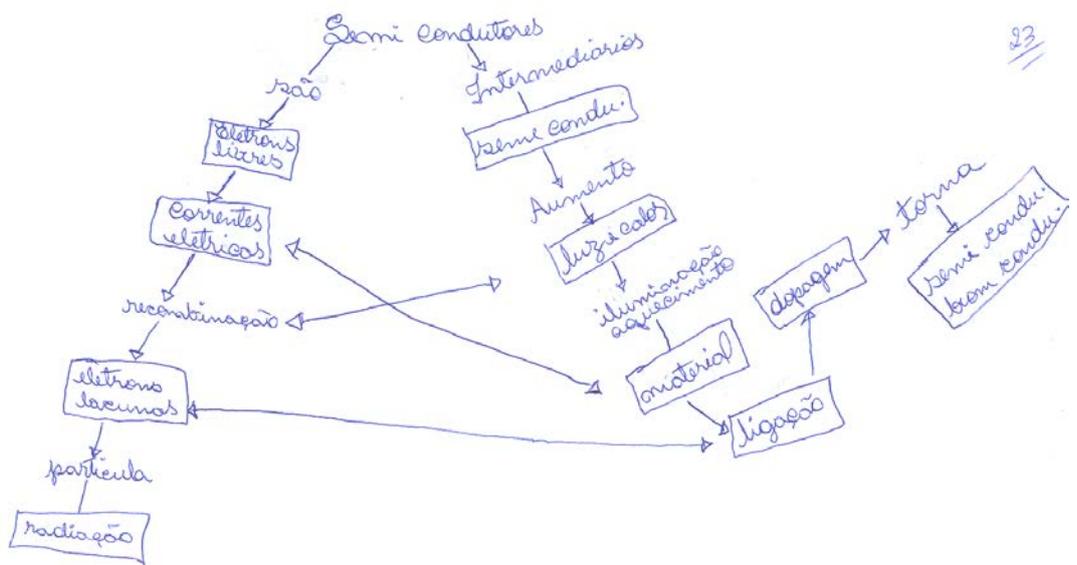
Primeira versão de mapa conceitual elaborado pelo Estudante 19.





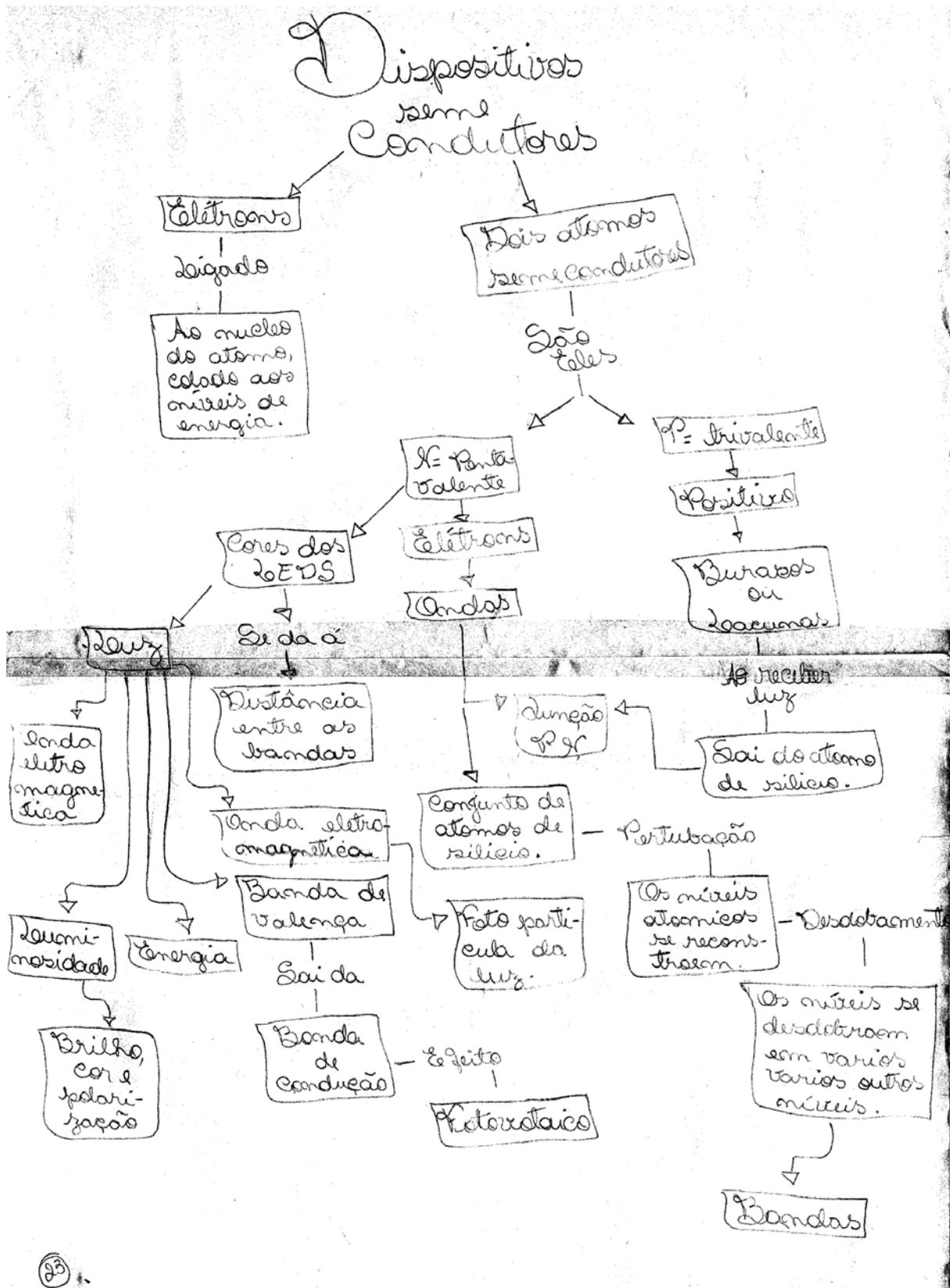
20

Segunda versão de mapa conceitual elaborado pelo Estudante 20.

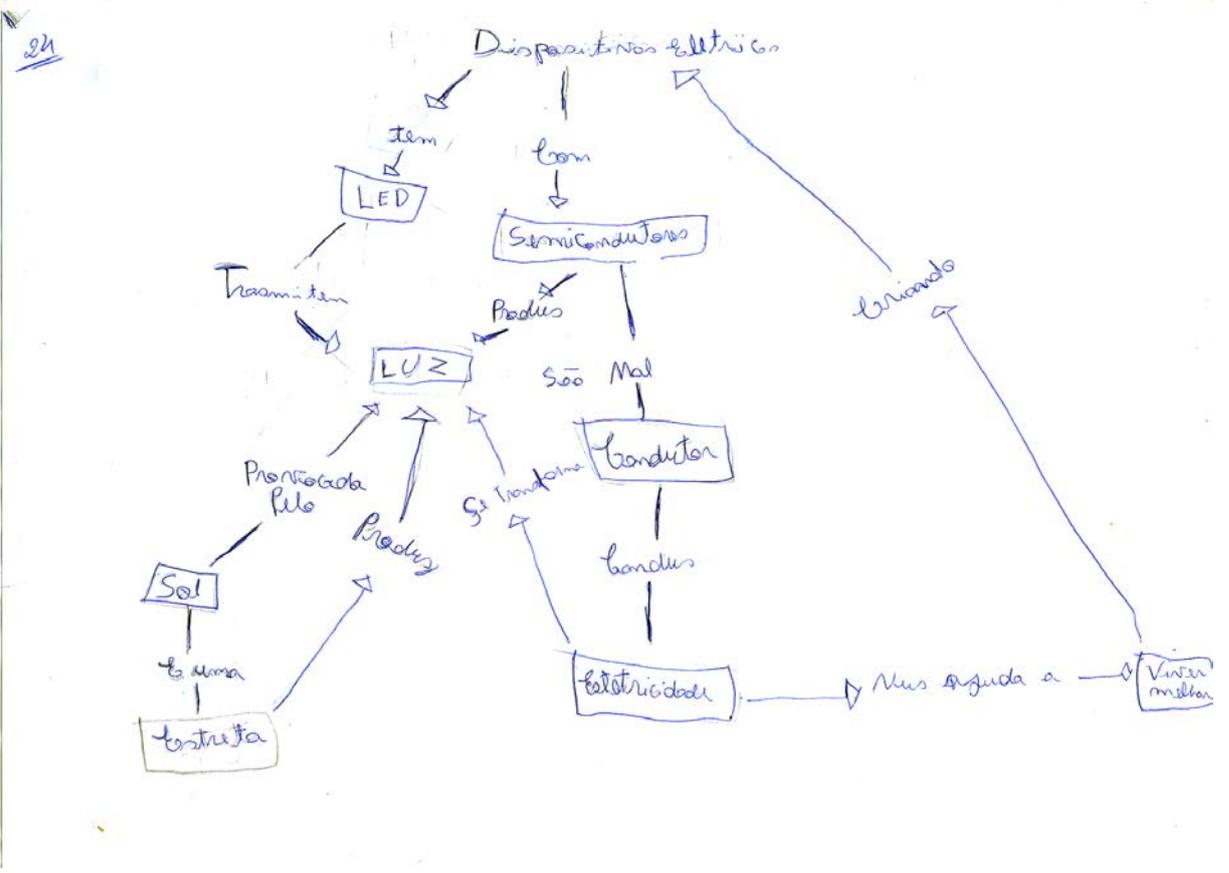


23

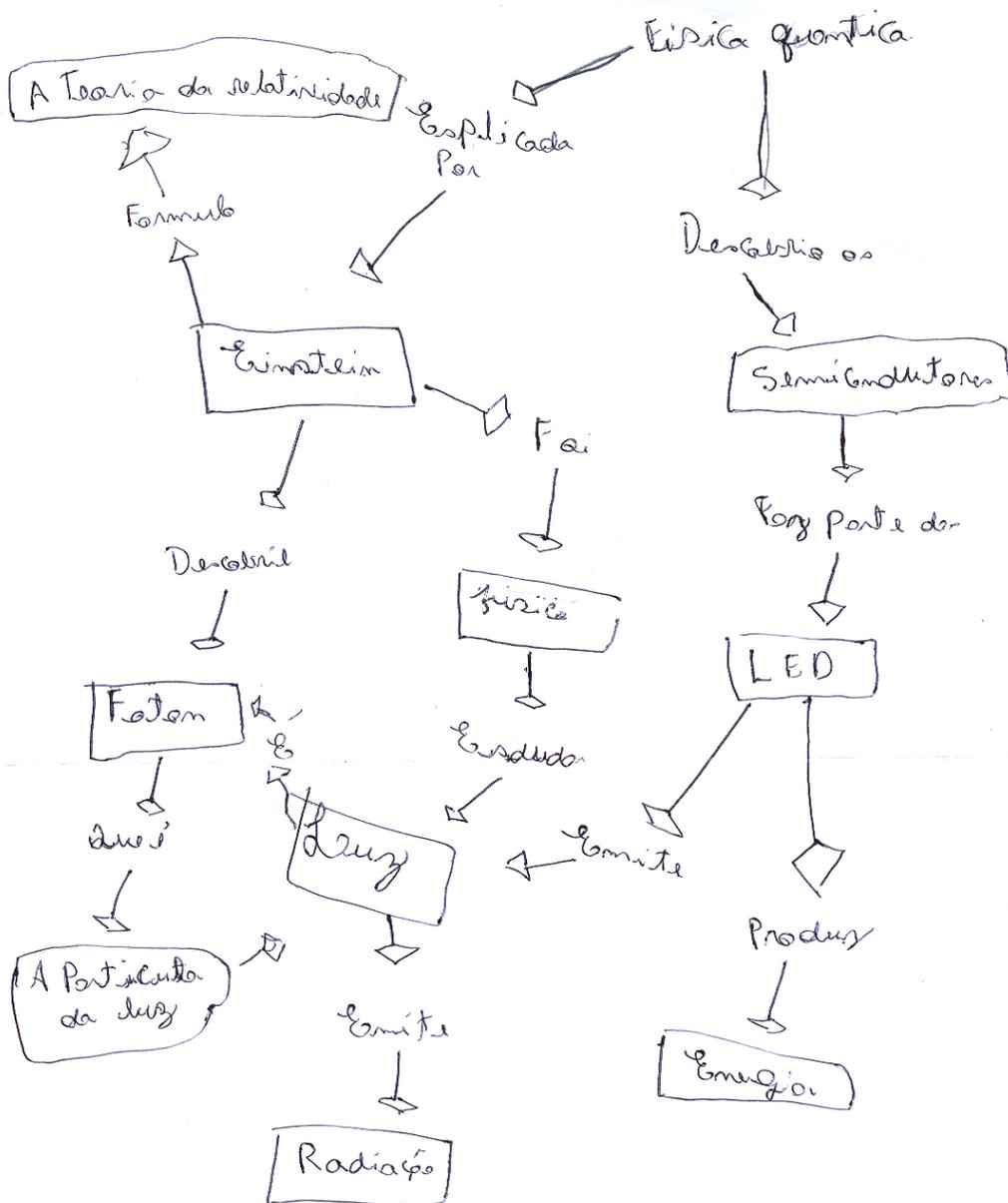
Primeira versão de mapa conceitual elaborado pelo Estudante 23.



Segunda versão de mapa conceitual elaborado pelo Estudante 23.



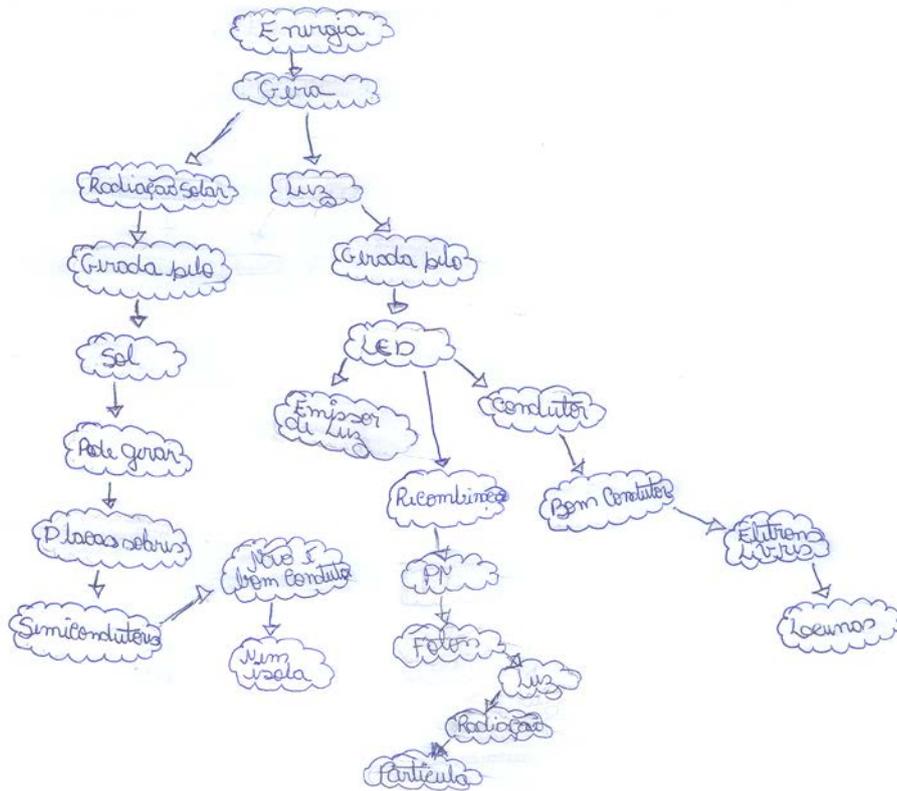
Primeira versão de mapa conceitual elaborado pelo Estudante 24.



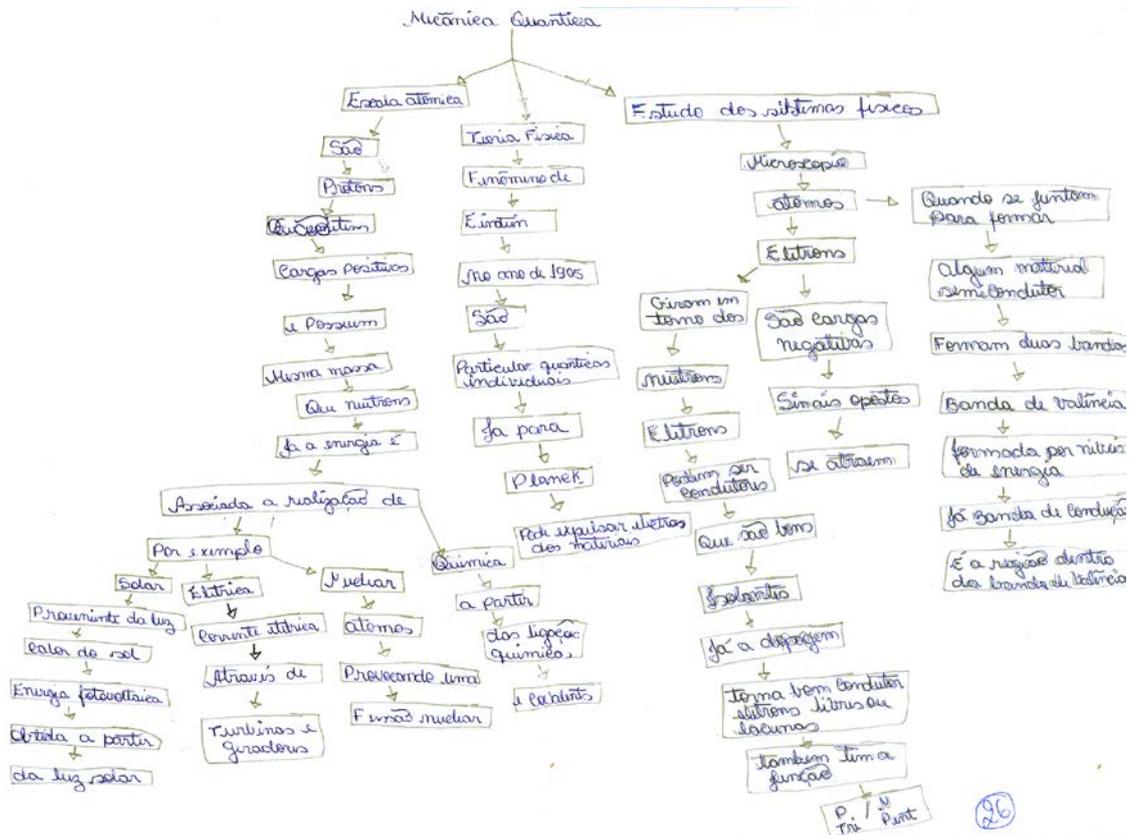
24

Segunda versão de mapa conceitual elaborado pelo Estudante 24.

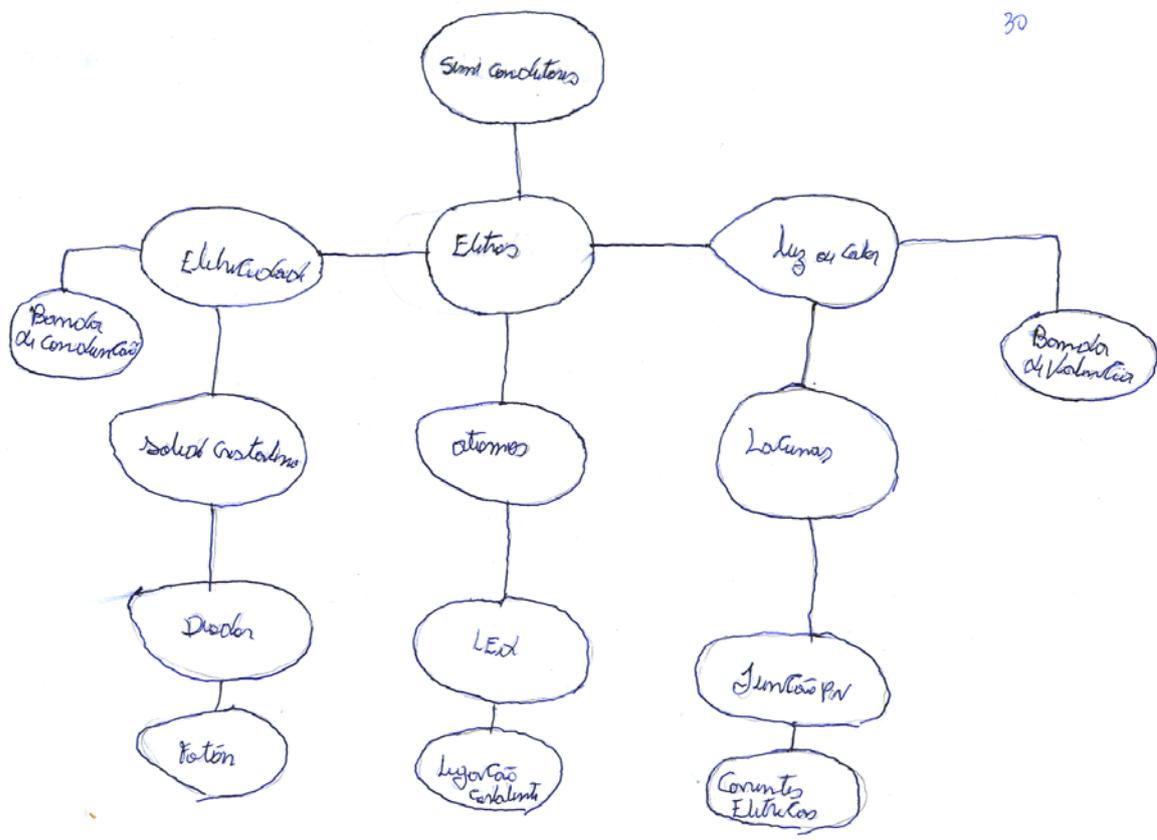
26



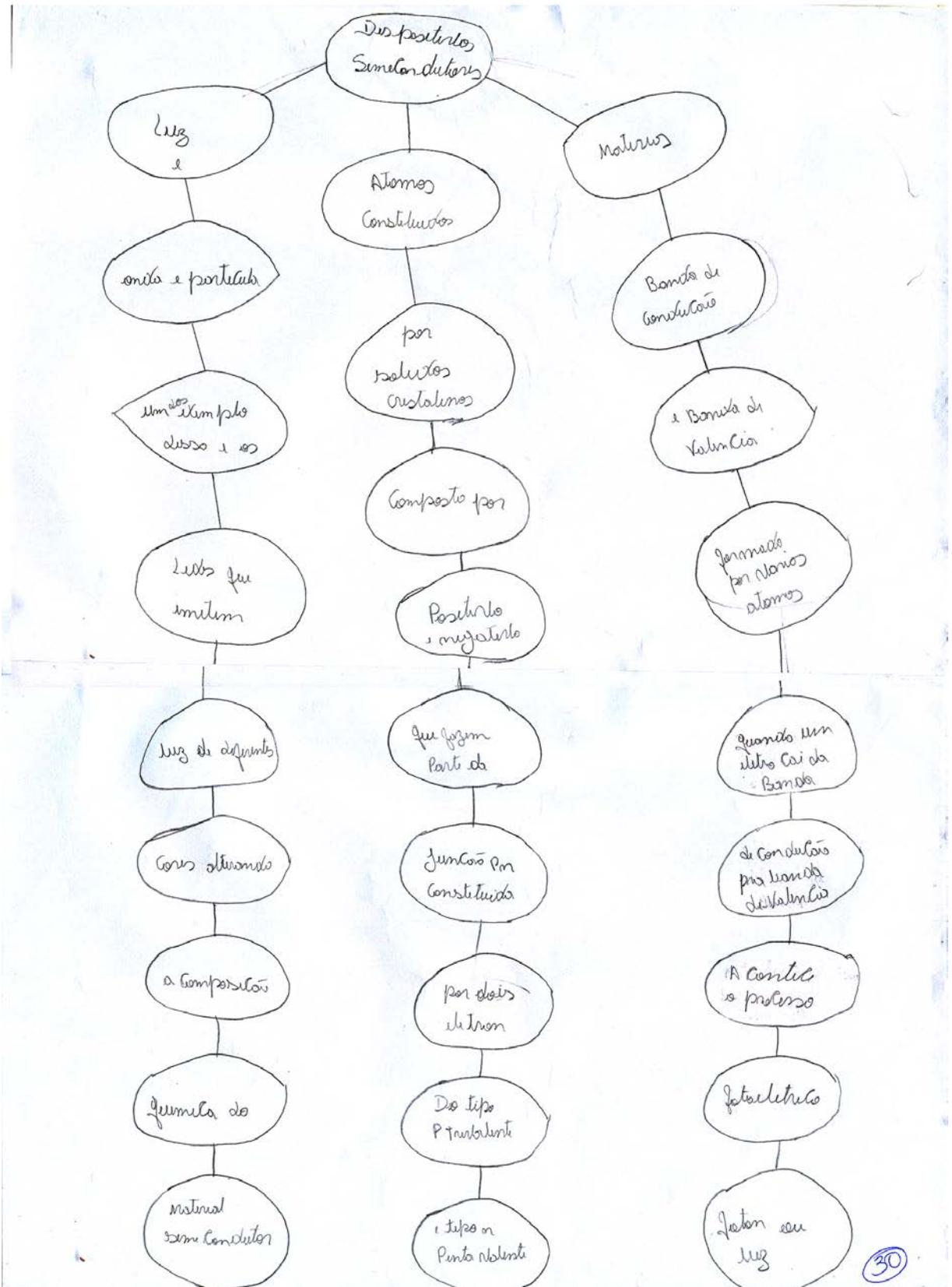
Primeira versão de mapa conceitual elaborado pelo Estudante 26.



Segunda versão de mapa conceitual elaborado pelo Estudante 26.



Primeira versão de mapa conceitual elaborado pelo Estudante 30.



Segunda versão de mapa conceitual elaborado pelo Estudante 30.