



**MNPEF** Mestrado Nacional  
Profissional em  
Ensino de Física



**JEFERSON ALBINO FLECK**

**A INTERAÇÃO RADIAÇÃO-MATÉRIA E OS PROCESSOS REATIVOS:  
UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA SIGNIFICATIVA PARA O ENSINO MÉDIO**

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, ofertado pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul em parceria com a Sociedade Brasileira de Física, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Prof. Dr. Jorge Rodolfo Silva Zabadal  
Orientador

Prof. Dr. Ederson Staudt  
Coorientador

Tramandaí  
Setembro de 2020

## CIP - Catalogação na Publicação

Fleck, Jeferson Albino

A Interação Radiação-Matéria e os Processos Reativos: Uma Sequência Didática Significativa para o Ensino Médio / Jeferson Albino Fleck. -- 2020.

137 f.

Orientador: Jorge Rodolfo Silva Zabadal.

Coorientador: Ederson Staudt.

Dissertação (Mestrado Profissional) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Campus Litoral Norte, Programa de Pós-Graduação do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, Tramandaí, BR-RS, 2020.

1. Modelos Quânticos. 2. Processos Reativos. 3. Radiação-Matéria. 4. Aprendizagem Significativa. 5. Simulação Computacional. I. Zabadal, Jorge Rodolfo Silva, orient. II. Staudt, Ederson, coorient. III. Título.

Jeferson Albino Fleck

**A INTERAÇÃO RADIAÇÃO-MATÉRIA E OS PROCESSOS REATIVOS:  
UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA SIGNIFICATIVA PARA O ENSINO MÉDIO**

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, ofertado pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul em parceria com a Sociedade Brasileira de Física, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Aprovada em 25 de setembro de 2020.

Prof. Dr. Jorge Rodolfo da Silva Zabadal – MNPEF/UFRGS (Presidente da Banca)

Prof. Dra. Karen Cavalcanti Tauceda – MNPEF/UFRGS

Prof. Dr. Roniere dos Santos Fenner – UFRGS

Prof. Dr. Nilson dos Santos Ferreira – UFS

## Dedicatória

À minha filha Beatriz, pela compreensão e pelo apoio que, com carinho, não mediu esforços para que eu chegasse até aqui.

Aos meus pais, Guido e Vera Fleck que foram exemplo de força, doação e de vida, que me encorajaram a dar sempre o melhor. A união da força do meu pai com o fazer sempre o melhor da minha mãe que formaram o que sou hoje.

À minha família por acreditar em mim e não medir esforços para que não estivesse sozinho nesta caminhada, em especial aos meus irmãos Josiele, Leandro, Luis e Elisandro.

Não somente à família que preciso agradecer, mas em especial ao Hugo que me incentivou a seguir adiante. Você disse para não ter medo e mostrar confiança.

Aos professores do curso, que deveriam ser citados aqui, que me acompanharam nesta formação. Os represento citando em especial ao professor Jorge Rodolfo Silva Zabadal e ao professor Ederson Staudt que foram responsáveis por este trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus amigos, pelas alegrias, tristezas e dores compartilhadas. Com vocês melhoraram as pausas entre um parágrafo e outro de produção, assim como tudo o que tenho produzido na vida.

À minha família, por sempre estarem ao meu lado, me apoiando. Mãe e Pai, mesmo que vocês não estejam mais conosco, sempre estão em meu pensamento, dando segurança e a certeza de que estão felizes, pois sempre nos apoiaram nos estudos.

## Resumo

O trabalho proposto apresenta uma nova abordagem para a investigação de modelos atômicos, estrutura da matéria, radiação e eletromagnetismo, integrando dois tópicos em ciências físicas que, a princípio, não estão relacionados entre si: a interação radiação-matéria e a Química Orgânica. Visa-se fornecer uma descrição mais precisa e intuitiva sobre os processos reativos, sob o prisma dos fenômenos do rearranjo, com base na análise de dois modelos matemáticos complementares: a equação de Klein-Gordon e a lei de Gauss do Eletromagnetismo. Para tanto, um novo modelo relativista auto-consistente para Física Quântica está sendo formulado. Do ponto de vista educacional, este trabalho segue a teoria da aprendizagem significativa, de David Paul Ausubel, no sentido de utilizar amplamente diversas conexões fundamentais com conceitos físicos consolidados, a fim de compreender novas ideias a respeito da radiação e da matéria.

Palavras-chave: Modelos quânticos, Radiação, Matéria, Aprendizagem significativa.

## Abstract

This work proposes a new approach to investigate atomic models, matter structure, radiation and electromagnetism, by integrating two a priori unrelated topics in physical sciences: interaction between radiation and matter and organic chemistry. The aim is to provide a more accurate and intuitive description of reactive processes, from the perspective of rearrangement phenomena, based on the analysis of two complementary mathematical models: the Klein-Gordon equation and the Gauss law of Electromagnetism. In order to accomplish this task, a new relativistic self consistent model for quantum physics is being formulated. From the educational point of view, this work follows the theory of meaningful learning, due to David Paul Ausubel, in the sense that crucial connections with well established physical concepts are widely employed to understand new ideas about radiation and matter.

Keywords: Quantum models, Radiation, Matter, Meaningful learning.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>9</b>
<b>2 A APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA</b> .....	<b>13</b>
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>16</b>
<b>4 O POTENCIAL DE CALIBRE</b> .....	<b>17</b>
<b>4.1 O POTENCIAL DE CALIBRE E AS MUDANÇAS DE FASE</b> .....	<b>22</b>
<b>5 O EFEITO INDUTIVO</b> .....	<b>25</b>
<b>5.1 NECESSIDADE DE REALIZAR O ACOPLAMENTO ENTRE MODELOS.</b> .....	<b>25</b>
<b>5.2 RESULTADOS PRELIMINARES DAS SIMULAÇÕES</b> .....	<b>27</b>
<b>5.3 A EVOLUÇÃO DO POTENCIAL DE INTERAÇÃO AO LONGO DO PROCESSO REATIVO</b> .....	<b>30</b>
<b>5.4 O MODELO BIDIMENSIONAL</b> .....	<b>37</b>
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>41</b>
<b>6.1 A PROPORÇÃO DE CARÁTER IÔNICO E A REGRA DE MARKOVNIKOFF</b> .....	<b>44</b>
<b>6.2 VALÊNCIAS ANÔMALAS E ORDENS FRACIONÁRIAS DE LIGAÇÃO</b> .....	<b>45</b>
<b>6.3 A FORMAÇÃO DE CARBÂNIONS E CARBOCÁTIONS</b> .....	<b>46</b>
<b>7 ANÁLISE DA APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL</b> .....	<b>47</b>
<b>7.1 AULAS 1 E 2</b> .....	<b>48</b>
<b>7.2 AULAS 3 E 4</b> .....	<b>49</b>
<b>7.3 AULAS 5 E 6</b> .....	<b>49</b>
<b>7.4 AULAS 7 E 8</b> .....	<b>50</b>
<b>7.5 AULAS 9 E 10</b> .....	<b>51</b>
<b>7.6 AULAS 11 E 12</b> .....	<b>52</b>
<b>7.7 AULAS 13 E 14</b> .....	<b>52</b>
<b>7.8 AULAS 15 E 16</b> .....	<b>53</b>
<b>8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS</b> .....	<b>55</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>57</b>
<b>APÊNDICE A – PRODUTO EDUCACIONAL</b> .....	<b>58</b>
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>61</b>
<b>ATIVIDADE 1: APLICAÇÃO DO QUESTIONÁRIO INVESTIGATÓRIO</b> .....	<b>66</b>
<b>ATIVIDADE 2: O QUE OS TEXTOS QUEREM REALMENTE DIZER?</b> .....	<b>71</b>
<b>ATIVIDADE 3: O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO</b> .....	<b>82</b>
<b>ATIVIDADE 5: VAMOS CONHECER A HISTÓRIA DOS ACIDENTES NUCLEARES E REFLETIR SOBRE O NOSSO FUTURO?</b> .....	<b>87</b>
<b>ATIVIDADE 6: AS REAÇÕES QUÍMICAS E A INTERAÇÃO COM AS RADIAÇÕES</b> .....	<b>89</b>

<b>ATIVIDADE 7: DENSIDADES ELETRÔNICAS.....</b>	<b>100</b>
<b>ATIVIDADE 8: AVALIAÇÃO.....</b>	<b>112</b>
<b>SOBRE O PRODUTO EDUCACIONAL .....</b>	<b>117</b>
<b>DESCRIÇÃO DO PRODUTO .....</b>	<b>118</b>
<b>5.2 ROTEIRO DE APLICAÇÃO.....</b>	<b>119</b>
<i>Atividade 1 – Aula 1 e 2:.....</i>	<i>119</i>
<i>Atividade 2 – Aulas 3 e 4: O que os textos querem realmente dizer?.....</i>	<i>120</i>
<i>Atividade 3 – Aulas 5 e 6: O Espectro Eletromagnético .....</i>	<i>120</i>
<i>Atividade 4 – Aulas 7 e 8: A Física Médica .....</i>	<i>121</i>
<i>Atividade 5 – Aulas 9 e 10: Acidentes Nucleares .....</i>	<i>122</i>
<i>Atividade 6 – Aulas 11 e 12: As reações químicas e a interação com as radiações. ....</i>	<i>122</i>
<i>Atividade 7 – Aulas 13 e 14: As Densidades Eletrônicas .....</i>	<i>123</i>
<i>Atividade 8 – Aula 15 e 16: Avaliação. ....</i>	<i>124</i>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>125</b>
<b>APÊNDICE B - RADIAÇÕES IONIZANTES E NÃO-IONIZANTES.....</b>	<b>127</b>
<b>2.1 TIPOS DE RADIAÇÕES IONIZANTES .....</b>	<b>127</b>
<b>2.2 RADIAÇÕES NÃO-IONIZANTES.....</b>	<b>129</b>
<b>2.3 - GRANDEZAS BÁSICAS USADAS NA ÁREA DAS RADIAÇÕES NÃO IONIZANTES: .....</b>	<b>130</b>
<b>2.4 GRANDEZAS BÁSICAS USADAS NA ÁREA DAS RADIAÇÕES IONIZANTES: .....</b>	<b>132</b>
<i>2.4.1 Atividade (A) .....</i>	<i>132</i>
<i>2.4.2 Exposição (X) .....</i>	<i>133</i>
<i>2.4.3 Dose absorvida (D).....</i>	<i>133</i>
<i>2.4.4 Dose equivalente (H) .....</i>	<i>133</i>
<i>2.4.5 Dose Efetiva (E).....</i>	<i>135</i>

## 1 INTRODUÇÃO

O Eletromagnetismo e a Mecânica Quântica constituem a base teórica mais confiável para a compreensão dos processos químicos. Em particular, dentre os mecanismos subjacentes aos processos reativos, o fenômeno chamado rearranjo das nuvens eletrônicas constitui o tema mais complexo, abrangente e absolutamente necessário para a elucidação da dinâmica das reações químicas, bem como dos princípios gerais de catálise homogênea e heterogênea.

Apesar da crucial importância do tema, a literatura especializada não o explora de forma adequada, fornecendo apenas citações breves sobre a ocorrência do rearranjo das nuvens, sem especificar as leis que regem sua respectiva dinâmica. Isso ocorre porque essas leis constituem equações diferenciais parciais bastante complexas.

O trabalho proposto visa fornecer uma descrição mais precisa e intuitiva sobre o fenômeno do rearranjo, com base na análise de dois modelos matemáticos complementares: a equação de Klein-Gordon e a lei de Gauss do Eletromagnetismo. Embora essas equações devessem figurar de forma efetiva em um componente curricular específico da Física, os recursos matemáticos e computacionais disponíveis até meados da década de 80 não permitiam a elaboração de sistemas rigorosos de simulação molecular, capazes de viabilizassem o estudo do fenômeno. Assim, foi elaborado um software de simulação de reações baseado em processamento simbólico, o que permitiu converter a simples análise das equações em um modelo qualitativo relativamente acessível, que foi implementado em sala de aula para alunos de Física do terceiro ano do ensino médio. A fim de esclarecer as vantagens do emprego dessa concepção semi-quantitativa, é importante levar em consideração algumas deficiências conceituais inerentes ao ensino da Física, e conseqüentemente da Química clássica. Uma das principais deficiências reside no tratamento superficial dedicado a um tópico de fundamental importância para ao estudo da interação entre radiação e matéria: o potencial de calibre. No eletromagnetismo esse tópico é tratado de forma relativamente imediatista, atribuindo a esse campo a condição de mera construção formal. As conseqüências dessa abordagem superficial induzem a equívocos de natureza conceitual, que serão discutidos a seguir.

As disciplinas relacionadas à Química são amplamente reconhecidas como pré-requisitos fundamentais para diversas aplicações tecnológicas, tais como a produção de polímeros condutores, materiais orgânicos termo-resistentes, e medicamentos. Entretanto, a síntese de novos compostos ainda é efetuada com base em conhecimento empírico, analogias limitadas e regras baseadas na interação entre grupos funcionais. Apesar de haver sido desenvolvida a chamada Teoria Qualitativa dos Orbitais Moleculares (QMOT), elaborada com base na Física Quântica com o objetivo de preencher lacunas lógicas em diversos tópicos de Química clássica, a obtenção de mecanismos e produtos de reação ainda constitui um tema bastante obscuro e controverso entre especialistas da própria área.

O desenvolvimento de métodos variacionais em Química Quântica, baseados nas formulações Combinação Linear de Orbitais Atômicos-Moleculares (LCAO-MO), estabeleceu uma base lógica e matemática para a Química Orgânica, e possibilitou o desenvolvimento de sistemas computacionais capazes de estimar propriedades moleculares com grande exatidão. Esses sistemas produziram uma nova intuição sobre propriedades físicas, e suas relações com as estruturas moleculares, lançando uma nova base teórica bastante confiável para a resolução de problemas em regime estacionário.

Infelizmente, esses sistemas ainda se mostram computacionalmente inviáveis para aplicações em regime transiente. Em particular, para efetuar previsões sobre mecanismos, compostos intermediários e produtos de reação, é necessário simular os chamados efeitos de campo, que regem o processo de rearranjo das nuvens eletrônicas de compostos químicos, quando atingidos por radiação incidente ou mesmo pela aproximação de outras moléculas. Esses eventos transientes, que constituem a base para compreender os processos reativos, requerem um desempenho computacional incompatível com as formulações hoje disponíveis. Isto ocorre porque essas formulações são baseadas em aproximações nas quais as funções de onda das moléculas são expressas como combinações lineares de funções que representam cada elétron presente no meio reativo. Os valores numéricos desses coeficientes são obtidos através de um procedimento iterativo, no qual o potencial de interação é inicialmente prescrito, sendo a seguir construído um sistema algébrico cuja ordem equivale ao número total de elétrons presentes nos compostos. Uma vez obtidos os coeficientes das funções de onda, o potencial de

interação é então recalculado através da avaliação de integrais múltiplas por via numérica, e o processo se repete até que seja atingida a convergência com determinada exatidão.

Nos processos reativos, o potencial varia ao longo do tempo, de modo que um novo laço interativo externo deveria ser aplicado ao roteiro variacional, a fim de obter a evolução temporal das funções de onda durante a reação. Essa tarefa exige um enorme esforço computacional, inviabilizando a execução do respectivo código fonte, em função do tempo de processamento requerido, que resultaria extremamente elevado, mesmo para sistemas reativos envolvendo pequenas moléculas. Uma vez que a escala de tempo na qual se processa o rearranjo da nuvem eletrônica é da ordem de  $10^{-12}$  segundos, e que o tempo total típico para a estabilização do sistema é de aproximadamente  $10^{-9}$  segundos, o número de laços iterativos requeridos para atingir o regime estacionário, ou mesmo a convergência marginal entre estruturas de ressonância, seria da ordem de 1000 iterações externas. Esse procedimento resulta impraticável até mesmo para a simulação de reações de adição entre dois átomos.

A fim de contornar essa dificuldade, o roteiro de cálculo tradicionalmente utilizado em Química Quântica foi totalmente reformulado, sendo o novo método concebido a partir de algumas diretrizes básicas:

- i) Reescrever o modelo em termos do potencial de interação, eliminando o processo iterativo e reduzindo o número de funções de base para uma por átomo, e não por elétron.
- ii) Empregar um modelo quântico relativista, tal como as equações de Dirac ou Klein-Gordon.
- iii) Utilizar modelos de eletromagnetismo como restrições diferenciais, visando facilitar o processo de obtenção de soluções em forma fechada, e assim dispensar o emprego de algoritmos numéricos.
- iv) Diretriz opcional - aperfeiçoar o sistema de geração de funções de base, representando cadeias inteiras por uma única função potencial.

No trabalho proposto foram empregadas a lei de Gauss e uma versão não-linear da equação de Klein-Gordon na qual figura exclusivamente o potencial de interação, a fim de obter um modelo matemático capaz de produzir códigos fonte extremamente compactos e com alto desempenho computacional. Esse sistema, que constitui o produto educacional, viabilizou a implementação de uma nova técnica de aprendizagem significativa. Essa técnica utiliza não apenas em recursos visuais, como o emprego de animações ilustrando o processo de rearranjo da nuvem eletrônica, mas unifica vários princípios de química clássica em uma única regra evolutiva baseada em argumentos puramente geométricos. O trabalho é sumarizado como segue: o capítulo 2 fornece noções básicas sobre aprendizagem significativa e o capítulo 3 traz a metodologia utilizada na construção desta dissertação. O capítulo 4 apresenta o conceito de potencial de calibre em teoria eletromagnética, que constitui um pré-requisito fundamental para a compreensão do efeito indutivo, descrito no capítulo 5. Esse capítulo apresenta a formulação do modelo matemático e sua interpretação geométrica, bem como alguns resultados preliminares. O capítulo 6 apresenta resultados e discute consequências cruciais que decorrem de sua interpretação em termos do modelo matemático. O capítulo 7 traz uma discussão sobre os resultados obtidos com a aplicação do Produto Educacional. O capítulo 8 encerra a dissertação, resumindo conclusões e fornecendo sugestões para trabalhos futuros.

## 2 A APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA

Segundo Moreira (1999, p.152) a ideia central da teoria de Ausubel se resume à seguinte sentença e “Se tivesse que reduzir toda a psicologia da educação a um só princípio, diria o seguinte: o fator isolado mais importante que influencia a aprendizagem é aquilo que o aprendiz já sabe. Averigue isso e ensine-o de acordo. ”O que o aprendiz já sabe baseia-se na sua estrutura cognitiva, que é compreendida como o conjunto total de ideias de um certo indivíduo e sua organização.

Quando se diz “Averigue-se o que o aprendiz já sabe”, temos que avaliar para conhecer a estrutura cognitiva, pois as novas ideias e informações são aprendidas e retidas na medida em que existem pontos de ancoragem.

Ensinar dentro da conformidade com o que o aprendiz já sabe remete a basear os ensinamentos na sua estrutura cognitiva. Quando falamos em aprendizagem, temos que ter em mente que isto implica não somente em acréscimos, como também em modificações na estrutura cognitiva.

Segundo Moreira (1999, p. 153) para Ausubel, a Aprendizagem Significativa ocorre quando o aprendiz ancora o novo conhecimento em conhecimentos que existem previamente na sua estrutura cognitiva. Neste processo a nova informação interage com uma estrutura de conhecimento específica que é chamada de **subsunçor** ou **conceito subsunçor**.

A aprendizagem significativa é progressiva, pois vamos dando significados as coisas, e a interação entre conhecimentos novos e conhecimentos prévios é uma característica chave da aprendizagem significativa.

A aprendizagem mecânica ou automática segundo Ausubel (1999, 154) acontece quando as novas informações chegam com pouca ou nenhuma associação aos conhecimentos relevantes já existentes na estrutura cognitiva do aprendiz, sendo esta informação armazenada de modo que não há uma sequência lógica, ou seja, de modo eventual. Deste modo, esta informação fica arbitrariamente distribuída na estrutura cognitiva sem ligar-se aos subsunçores específicos, ficando o aluno como alguém que resume seu aprendizado ao simples ato de decorar fórmulas para uma prova, ou um estudo de última hora, sem significação.

Partindo do pressuposto que a aprendizagem mecânica se faz necessária, conforme Moreira (1999, p.154) sempre que um aprendiz adquire novas informações em uma área de conhecimento completamente nova, ocorrendo até que alguns

elementos do conhecimento, relevantes e inerentes às novas informações da mesma área, se formem na estrutura cognitiva e possam ser usados como subsunçores, mesmo que pouco elaborados. A medida que a aprendizagem começa a ser significativa, esses subsunçores vão ficando cada vez mais desenvolvidos, elaborados e capazes de ancorar novas informações, tornando então a aprendizagem significativa.

A medida que a criança pequena vai crescendo, novos conceitos vão sendo formados e ao atingir a idade escolar, a criança já possui um conjunto de conceitos adequados de modo a permitir a ocorrência de uma aprendizagem significativa.

Para Ausubel (1999, p.155) o uso dos organizadores prévios serve de âncora para as novas aprendizagens e levam ao desenvolvimento de subsunçores que facilitam a aprendizagem subsequente. O uso dos organizadores prévios, proposto por Ausubel, serve para intencionalmente manipular a estrutura e então facilitar a aprendizagem significativa.

Quando falamos em organizadores prévios nos referimos aos materiais introdutórios apresentados antes do material a ser aprendido, destacando certos aspectos do assunto, sendo apresentados de modo superior de abstração, de generalidade e inclusividade. A função dos organizadores prévios é de servir de ponte entre o que o aprendiz já sabe e o que deve ser aprendido, de forma significativa, sendo úteis para facilitar a aprendizagem funcionando como “pontes cognitivas”.

Para Pelizzari (2001, p.38) para ocorrer uma aprendizagem significativa, devem haver as seguintes condições:

- a) O aluno precisa ter disposição ao aprender, caso o aprendiz queira memorizar o conteúdo sem a devida lógica e de modo literal, a aprendizagem será mecânica.
- b) O conteúdo a ser aprendido tem que ser ao mesmo tempo lógico e psicologicamente significativo. O significado lógico depende da natureza do conteúdo e o significado psicológico é a experiência que o aprendiz tem ao aprender. Cada aprendiz faz sua filtragem dos conteúdos que lhe é significativo ou não para si mesmo.

A motivação do aluno é a própria aprendizagem, ocorrendo por si só. Quando se aprende algo novo, há uma satisfação inicial que estimula o desenvolvimento do próprio ato de aprender. A partir do momento que o aluno conhece os objetivos do

ensino, que devem ser claros e relacionados ao imediato, motivando-o ao ponto onde o aspecto cognitivo deve ser a sua preocupação.

Segundo a teoria de Ausubel, conforme aponta Cruz (2008, p.3) a aprendizagem pode se dar tanto por descoberta quanto por recepção:

- a) Descoberta: o aluno deve aprender “sozinho”, deve descobrir algum princípio, relação, lei, ... como pode, também, acontecer na solução de um problema.
- b) Recepção: recebe-se a informação pronta (como em uma aula expositiva) e o trabalho do aluno consiste em atuar ativamente sobre esse material, a fim de relacioná-lo a ideias relevantes disponíveis em sua estrutura cognitiva.

Para Ausubel, conforme é dito por Moreira (2016, p.9) tanto por recepção ou por descoberta, a aprendizagem só se faz significativa, se o novo conteúdo incorpora-se, de forma não-arbitrária e não-literal, à estrutura cognitiva. Isso significa que aprendizagem por descoberta não é, necessariamente, significativa nem aprendizagem por recepção é, obrigatoriamente, mecânica. Tanto uma como outra pode ser significativa ou mecânica, dependendo da maneira como a nova informação é armazenada na estrutura cognitiva.

Quando Ausubel fala nos subsunçores fundamentais, podemos usar alguns deles de maneira cruzada, pois não somente o subsunçor do aluno que precisa aprender um novo conceito para poder evoluir a partir daquela zona de conforto, o pesquisador, o professor também precisa pegar um ou mais conceitos prévios que possui e revisar e enxergar as utilidades práticas em outro lugar.

### 3 METODOLOGIA

Este trabalho será desenvolvido em uma turma de terceiro ano de Ensino Médio, de modo interdisciplinar, envolvendo os componentes curriculares Física e Química na forma de uma Sequência Didática, voltada para problematização da Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente (CTSA)

Será abordada a temática das radiações de amplo espectro de energia, conteúdo pertencentes tanto à Física Moderna, especificamente nos conteúdos de Física Nuclear quanto à Química, da área das reações atômicas e nucleares, ambos os conteúdos do último ano do ensino médio.

Quanto ao modo de abordagem, os conteúdos serão organizados de modo que as duas componentes curriculares, física e química, “conversem” entre si. Nas interações das radiações de alta energia, no campo da física será desenvolvido, primeiramente, a definição de radiação, quais são de baixa e de alta energia, radiação ionizante, em seguida a temática das energias envolvidas na interação e quebra de moléculas. No campo da química, será visto o conceito de reação nuclear, das reações químicas que produzem o arranjo da molécula, a densidade da nuvem eletrônica nas moléculas, quais as ligações que serão quebradas nesta interação.

Para início do desenvolvimento do produto educacional inicialmente será aplicado um questionário/teste para verificar quais os conhecimentos que os alunos têm, os organizadores prévios. A partir dele, os novos conteúdos serão ancorados nos pré-existentes.

Para desenvolver o assunto, após as verificações dos organizadores prévios, iniciará os estudos com um histórico das radiações, passando às medições envolvidas na dinâmica das radiações.

Durante o desenvolvimento desta Sequência Didática, se buscará desenvolver significação da aprendizagem, à luz da Teoria de David Ausubel, dentro do período letivo de 15 horas/aula.

#### 4 O POTENCIAL DE CALIBRE

Os enunciados dos problemas envolvendo processos reativos em Química apresentam moléculas de reatantes e requerem que sejam estimados os respectivos produtos de reação, utilizando regras baseadas na recombinação de grupos funcionais. Embora essas regras não sejam absolutamente confiáveis, nos habituamos a aceitar essa prática tradicional, tal como se tratasse de uma abordagem precisa, e não da tentativa de descrição de um processo dinâmico cuja evolução temporal foge ao escopo da disciplina. Para certos cenários específicos, mesmo utilizando modelos quânticos não é possível estimar os produtos de reação exclusivamente a partir dos respectivos reatantes. Por exemplo, considerando a reação entre álcool etílico e ácido acético, mesmo que sejam conhecidas as funções de onda para cada reatante, é preciso também definir a temperatura na qual se supõe ocorrer a reação, além de informar sobre a eventual presença de catalisadores, sejam eles químicos ou radiações incidentes. Somente após completar o enunciado do problema com essas informações auxiliares, se torna realmente possível utilizar modelos quânticos para estimar os respectivos produtos de reação. Em particular, a presença de radiação incidente figura explicitamente no modelo, na forma de uma função de onda adicional ou do chamado potencial de calibre, um componente que permite o acoplamento adequado entre os modelos quânticos e as equações de Maxwell, que regem a evolução do campo fotônico durante o processo reativo.

Em resumo, o resultado de um processo reativo pode ser estimado ao acoplar modelos de Física Quântica e Eletromagnetismo, obtendo um sistema de equações diferenciais parciais não-lineares, cuja resolução fornece a função de onda e o potencial de interação correspondente. A função de onda é empregada na obtenção da densidade eletrônica, enquanto o potencial de interação informa a intensidade das forças que atuam entre átomos adjacentes. O modelo quântico adotado no trabalho proposto é a equação de Klein-Gordon, definida como

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \psi - \nabla^2 \psi + \frac{m_0^2 c^2}{\hbar^2} \psi + V\psi = 0 \quad (1)$$

Nessa equação,  $\psi$  representa a função de onda,  $V$  o potencial de interação,  $c$  a velocidade da luz no vácuo,  $h$  a constante de Planck e  $m_0$  a massa da partícula a considerar.

Cabe aqui uma observação de fundamental importância. Embora a forma original da equação de Klein-Gordon possa ser aplicada somente a partículas de spin zero, como mésons, no trabalho proposto é desenvolvido um modelo de campo auto-consistente que pode ser facilmente convertido em forma vetorial, válida também para partículas cujo spin é arbitrário. Na prática, isto significa que a forma final do modelo vale também para elétrons, nêutrons e prótons, sendo, portanto aplicável tanto a reações químicas quanto nucleares. Será demonstrado em seções posteriores, que o modelo resultante do acoplamento entre uma forma não-linear da equação de Klein-Gordon e a lei de Gauss pode ser resolvido por via analítica, utilizando variáveis complexas. Tal como no trabalho de Teixeira Santos (2018), esse recurso se mostra particularmente útil para simplificar o processo de integração das equações diferenciais, resultando em soluções exatas em forma explícita, tanto para o potencial de interação quanto para a função de onda. Entretanto, para fins de pós-processamento, torna-se mais conveniente utilizar o potencial de interação para elaborar mapas de isolinhas. Esses mapas ilustram de forma bastante clara as ligações entre átomos vizinhos, fornecendo noções qualitativas e quantitativas sobre sua força, bem como sobre as proporções entre caráter iônico e covalente das ligações.

Ao inspecionar a equação de Klein-Gordon em sua forma original (equação 1), surge uma dúvida quanto à maneira pela qual a radiação incidente pode ser introduzida no modelo quântico. Para que esse modelo matemático contemple a contribuição da radiação incidente, é necessário representar a função de onda da seguinte forma:

$$\psi = \psi_{\text{molecular}} + \psi_{\text{radiação}} \quad (2)$$

A primeira contribuição obedece à equação dinâmica em sua forma original, enquanto a segunda satisfaz ao respectivo modelo de partícula livre:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \psi_{\text{molecular}} - \nabla^2 \psi_{\text{molecular}} + \frac{m_0^2 c^2}{\hbar^2} \psi_{\text{molecular}} + V \psi_{\text{molecular}} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \psi_{\text{radiação}} - \nabla^2 \psi_{\text{radiação}} = 0 \quad (4)$$

Essa decomposição tem por objetivo determinar o espectro de radiação que interage com as moléculas. Esse espectro representa um conjunto de feixes primários monoenergéticos de frequências bem definidas. Embora esta parte do conteúdo seja inacessível a alunos do ensino médio, é importante ter em mente que será abordada de um ponto de vista qualitativo, que não exige conhecimento prévio sobre equações diferenciais. Trata-se de uma abordagem essencialmente gráfica, onde o aluno visualiza a interação da radiação com as nuvens eletrônicas dos átomos envolvidos. Essas interações causam deformações locais na eletrosfera, o que eventualmente pode provocar o rompimento de ligações já existentes, possibilitando assim a formação de novas ligas. O mecanismo através do qual ocorre o rearranjo da nuvem eletrônica, provocado tanto pela incidência de radiação quanto pela aproximação de novos átomos ou moléculas, será abordado na seção que descreve a dinâmica subjacente ao modelo quântico.

É importante observar que ao acrescentar a parcela  $\psi_{\text{radiação}}$  para compor a função de onda total, o potencial de interação será alterado, mas a densidade eletrônica permanecerá invariante, caso análogo ao que ocorre com o potencial de calibre no eletromagnetismo, isto é, mesmo alterando o potencial de calibre, não serão alterados o campo elétrico e a indução magnética.

Em face dessas considerações, surge então a seguinte questão: qual a importância prática de considerar o potencial de calibre na teoria eletromagnética? A função do potencial de calibre consiste em perturbar a função de onda total, modificando sua respectiva função de fase, que provoca de forma indireta o deslocamento relativo entre os núcleos dos átomos. Entretanto, esse deslocamento é produzido pela força de Lorentz, que constitui um modelo independente das equações de Maxwell. A fim de elucidar o argumento, basta considerar que o potencial de calibre obedece à equação.

$$\square \chi = 0 \quad (5)$$

enquanto as próprias equações de Maxwell podem ser expressas na forma

$$\square A = -J \quad (6)$$

Assim, a presença do potencial de calibre não afeta o quadrivetor  $J$ . Em outras palavras, somar o potencial de calibre ao quadrivetor  $A$  não causará alterações na densidade de corrente  $J$ , pois o potencial de calibre obedece à equação homogênea associada. A situação é análoga ao efeito da derivação de uma função. Ao derivar uma função que contém ou não uma constante aditiva, o resultado será exatamente o mesmo. De forma semelhante, o potencial de calibre é a informação perdida ao aplicar o operador d'alembertiano<sup>1</sup>  $\square$ . Essa informação consiste em funções que pertencem ao espaço nulo do operador, isto é, funções que são anuladas através da aplicação do operador.

Embora o potencial de calibre não altere diretamente o quadrivetor  $J$  nas equações de Maxwell, seu gradiente contribui significativamente para a força de Lorentz, que determina a aceleração das partículas que interagem com o potencial eletromagnético. Dessa forma, o potencial de calibre, que representa a radiação incidente em um sistema reativo, afeta diretamente a trajetória das partículas carregadas e portanto, suas funções de onda. A evolução temporal dessas funções, por sua vez, estabelece toda a dinâmica do processo reativo, determinando se novas ligações serão formadas, bem como de ligações já existentes serão alteradas ou mesmo rompidas. Por essa razão, o potencial de calibre tem um papel importante no trato das informações de físico-químicas. Caso não seja incluído o potencial de calibre na definição da força de Lorentz, a dinâmica relativa ao rearranjo da nuvem eletrônica segue um padrão evolucionar totalmente diferente do obtido ao considerar somente a presença dos átomos envolvidos no processo. Isso ocorre porque não serão conhecidas informações cruciais a respeito das deformações que a radiação envoltória provocará na nuvem eletrônica da molécula. As próprias estruturas canônicas de ressonância também dependem da escolha do potencial de calibre.

Neste ponto, cabe um esclarecimento com relação à etapa de pós-processamento. Para essa etapa foi escolhido o potencial de interação ao invés da

---

<sup>1</sup> Operador d'alembertiano, de acordo com o dicionário Michaelis, é um operador matemático, particularmente importante na descrição de sistemas ondulatórios. Consiste na soma das derivadas parciais segundas em relação às coordenadas do sistema, considerando a métrica do espaço que, nas quatro dimensões do espaço-tempo, é a diferença entre o laplaciano e a derivada parcial segunda em relação ao tempo, dividida pelo quadrado da velocidade da luz.

O operador d'alembertiano, para coordenadas cartesianas é definido como

$$\square = \partial^\mu \partial_\mu = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2}{\partial y^2} - \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

função de onda, para elaborar os mapas que descrevem as estruturas moleculares em estudo. Ocorre que a função de onda por si só não fornece todas as informações necessárias, do ponto de vista gráfico, sobre a dinâmica do sistema reativo. O campo responsável por informações complementares, como a intensidade das ligações e a profundidade dos poços atrativos é o potencial total de interação, que inclui o próprio potencial de calibre. Essa composição fornece informações sobre o campo de fótons que media as interações entre os elétrons presentes no sistema molecular. Traçando uma analogia simplificada com a Mecânica de Fluidos, a informação de natureza gráfica que o potencial de interação apresenta é comparável à de um campo completo de escoamento, enquanto a densidade eletrônica permite visualizar apenas as esteiras de vórtices. Para tornar o argumento mais concreto, basta imaginar um cenário no qual ocorre o escoamento viscoso de um rio turbulento, repleto de vórtices, provocados pela ação da corrente principal sobre corpos submersos, margens e ilhas. Nesta analogia específica, ao omitir o potencial de interação e considerar somente a função de onda relativa aos componentes materiais do meio reativo (moléculas), a informação relativa à corrente principal (radiação incidente) é totalmente perdida. Em termos da descrição das linhas de fluxo, analisar o mapa de densidade eletrônica permite apenas visualizar os vórtices formados, sem perceber a corrente principal que os produziu.

Neste ponto, o leitor mais atento poderia argumentar que bastaria introduzir a função de onda relativa à radiação incidente, a fim de disponibilizar a informação relativa ao potencial de calibre nos mapas elaborados durante a etapa de pós-processamento. Entretanto, a análise de mapas de funções de onda não constitui um processo claro e simples como a visualização do potencial de interação. Em outras palavras, a informação está realmente presente na função de onda, mas se apresenta de forma relativamente contra-intuitiva para o público em geral.

No que diz respeito ao aspecto educacional, embora possa parecer que o trabalho proposto tenha como foco principal o modelo matemático, os resultados deste são amplos o que permite a consideração de inúmeros assuntos. A título de exemplo há uma série de informações bastante confiáveis nos textos clássicos de Química, de modo que o subsunçor a considerar no processo de aprendizado consiste no próprio conhecimento prévio de química que o aluno já traz consigo. O subsunçor do professor, por sua vez, consiste no conhecimento adquirido sobre Teoria

Eletromagnética e Física Quântica. Neste trabalho, o produto educacional tem como papel principal estabelecer uma base lógica mais sólida, fundamentada em disciplinas da Física consistentemente estabelecidas para a compreensão dos mecanismos que descrevem a dinâmica dos processos reativos. Essa nova base teórica justifica algumas regras confiáveis da Química Orgânica, além de suprir a eventual ausência destas, caso o aluno se defronte com reações químicas de maior complexidade. Em particular, o produto educacional ressalta a importância do potencial de calibre nos processos reativos e de mudança de fase, fornecendo princípios gerais de catálise.

Em suma, o objetivo final do trabalho consiste em refinar o ensino de Química com base nos assuntos estudados, por muitas vezes, exclusivamente pela Física, possibilitando ao aluno estimar mecanismos, compostos intermediários e produtos de reação, mesmo quando envolvem moléculas mais complexas, como no caso dos processos bioquímicos. Além disso, o produto educacional também possibilita ao aluno iniciar estudos sobre seleção e formulação de catalisadores específicos, através de um processo semi-quantitativo que inicia por tentativa e erro, tornando-se gradualmente sistemático e intuitivo. A fim de ressaltar a viabilidade desse estudo ao longo do ensino médio, será apresentado um argumento essencialmente intuitivo sobre a importância do potencial de calibre nos processos envolvendo mudanças de fase. Esse material preliminar é apresentado a seguir de forma sumária.

#### **4.1 O potencial de calibre e as mudanças de fase**

Embora seja fato amplamente conhecido que a água tem um ponto de ebulição de 100 °C à pressão atmosférica, observa-se, no entanto, que uma poça de água evapora a temperaturas bastante inferiores, como por exemplo, a 20 °C. Existem na Termodinâmica clássica, definições de pressão de vapor e fugacidade, que representam medidas da tendência a abandonar a fase líquida, que as moléculas apresentam sob certas condições de temperatura e pressão. Entretanto, nos textos clássicos de Termodinâmica não há qualquer referência à necessidade da presença de certos componentes do espectro eletromagnéticos para que o processo de evaporação de fato ocorra. Esse processo consiste na ruptura de ligações intermoleculares, chamadas ligações de Van der Waals, responsáveis pela

manutenção da fase líquida. Ao escolher corretamente o potencial de calibre para representar a radiação incidente sobre as moléculas, verifica-se que essa ruptura é prevista por modelos matemáticos de Teoria Eletromagnética (Santos, 2018). Esses modelos também efetuam uma previsão semelhante à dos textos de Mecânica Quântica, que estabelecem frequências mínimas para as quais o rompimento de determinadas ligações pode ocorrer. Esse princípio é essencialmente o mesmo que rege os processos reativos, uma vez que não se pode distinguir ligações de Van der Waals das chamadas ligações químicas, que são intramoleculares. Essas ligações diferem apenas no seu comprimento típico e, portanto, em sua intensidade, mas não em sua natureza eletromagnética. Este fato permite que o argumento anterior seja extensível aos processos reativos, o que de fato acontece na prática. Para exemplificar esse argumento, basta considerar o processo de formação do hexaclorobenzeno (BHC) também chamado hexacloro de benzeno ( $C_6Cl_6$ ), resultante da reação entre uma molécula de Benzeno e três moléculas de Cloro. Nesse processo, o benzeno ( $C_6H_6$ ) reage com o cloro ( $Cl_2$ ) somente na presença de radiação ultravioleta. Contudo, não há justificativas plausíveis na Química Orgânica clássica para que os átomos de Carbono, todos supostamente com hibridização  $sp^2$ , se desprendam dos átomos de Hidrogênios aos quais estavam ligados, apenas sob essas condições. Naturalmente, a ruptura das ligações entre carbonos e hidrogênios é uma condição necessária para que os átomos de Carbono, passem a formar ligações com os átomos de cloro. Além disso, esse fato foi comprovado experimentalmente para diversas reações de formação de haletos orgânicos a partir de hidrocarbonetos aromáticos. Na prática, esses haletos nunca se formam espontaneamente, o que ocorre de imediato na presença de radiação ultravioleta ou feixes de Raios X.

Em face dessas considerações, é importante observar que o papel do catalisador como redutor da energia de ativação de reações químicas deve ser revisto e questionado. Em primeiro lugar, a energia de ativação é medida na banda térmica que, via de regra, não é capaz de catalisar reações. Em segundo lugar, o respectivo ensaio é efetuado em calorímetros ou em autoclaves, de modo que só é possível controlar a temperatura do meio, e não o espectro da radiação incidente. Convém lembrar que esses recipientes apenas sofrem aquecimento por chama pelo lado externo, não estando seu conteúdo exposto à ação direta de feixes primários de

radiação cuja frequência típica é controlável. Assim, ao aumentar a temperatura do meio, surgem pequenas quantidades de radiação de frequências relativamente elevadas. Dependendo do peso molecular dos reatantes envolvidos, bem como de detalhes estruturais das moléculas presentes no meio a frequência mínima de catálise pode eventualmente ser atingida. Então, devido à presença de uma quantidade bastante reduzida de radiações cuja frequência esteja acima do respectivo valor de corte para o rearranjo da eletrosfera, a reação pode eventualmente ocorrer. Naturalmente, se um feixe contendo a mesma quantidade de radiação acima da frequência mínima, incidir diretamente sobre o meio, a reação será deflagrada do mesmo modo. Entretanto, comparando as energias empregadas para catalisar a reação via aquecimento ou incidência direta de radiação de alta frequência, conclui-se naturalmente que o segundo processo utiliza apenas uma pequena fração da energia requerida pelo primeiro, Esse fato pode induzir a acreditar que a presença de catalisadores reduza a energia de ativação da reação, Será mostrado a seguir que o processo de catálise pode ser induzido também pela simples aproximação de uma molécula adicional, que deforma a nuvem eletrônica dos reatantes, produzindo resultados similares. Esse fenômeno, denominado efeito indutivo ou efeito de campo, será explorado em maior detalhe no próximo capítulo

## 5 O EFEITO INDUTIVO

Uma das grandes dificuldades encontradas no estudo dos processos reativos consiste na compreensão da dinâmica subjacente ao rearranjo das nuvens eletrônicas. Como já mencionado anteriormente, esse processo não depende somente da conformação inicial das eletrosferas das moléculas envolvidas, mas também da radiação envoltória.

Os modelos quânticos usualmente empregados para efetuar simulações de processos em escala molecular utilizam a Equação de Schrödinger. Essa equação constitui um modelo não relativista, obtido a partir de um balanço local de energia. Além desse modelo, são empregadas também as Equações de Dirac, modelo relativista oriundo da fatoração da equação de Klein-Gordon, deduzida a partir de um balanço de massa-energia. Todos os modelos quânticos requerem o conhecimento prévio do potencial de interação, sem o qual não é possível determinar a função de onda, variável utilizada para calcular a função densidade eletrônica. Os mapas de densidade eletrônica mostram a distribuição da nuvem em torno de pares de átomos, fornecendo informações qualitativas sobre as ligações químicas.

O modelo eletromagnético, constituído pelas equações de Maxwell, é empregado para calcular o potencial de interação a partir de um campo vetorial denominado corrente de carga ( $J$ ). A corrente, por sua vez, pode ser obtida a partir da densidade de carga e do vetor velocidade, que são definidos a partir da função de onda. Assim, o modelo eletromagnético é complementar aos modelos quânticos, pois requer o conhecimento prévio da função de onda para obter o potencial de interação.

Ao acoplar o modelo quântico ao eletromagnético, torna-se possível eliminar uma das variáveis dependentes (potencial ou função de onda), produzindo equações diferenciais parciais não-lineares. No trabalho proposto, o modelo acoplado é obtido a partir da equação de Klein-Gordon e da lei de Gauss da eletricidade, uma das equações de Maxwell, que especifica o potencial de interação a partir da densidade de carga.

### 5.1 Necessidade de realizar o acoplamento entre modelos.

Embora os modelos quânticos possam ser utilizados de forma isolada em problemas de simulação molecular, isto é, possam levar em consideração a interação da radiação com as eletrosferas, esses modelos demandam tempo de processamento bastante elevado para emular o rearranjo das nuvens eletrônicas. Isto ocorre porque, na ausência de uma expressão para o potencial de interação, torna-se necessário recorrer a formulações iterativas. Nessas formulações, o potencial é inicialmente arbitrado, sendo o modelo quântico resolvido para a função de onda, que é utilizada para obter a densidade eletrônica, que finalmente é empregada para corrigir o potencial inicialmente arbitrado. O processo se repete até que seja atingida a convergência do potencial e da função de onda com margem de tolerância pré-estabelecida, resultando na obtenção dos chamados potenciais de campo autoconsistentes [Zimmermann]..

Embora essa classe de métodos, denominada “ab initio”, forneça mapas bastante confiáveis para a função densidade eletrônica, as iterações efetuadas demandam elevado tempo de processamento, devido ao número excessivo de operações com ponto flutuante, tanto no processo de resolução do modelo quântico quanto na correção do potencial. Na primeira etapa, o modelo é resolvido através de uma formulação que utiliza uma expansão da função de onda como combinação linear de funções de base previamente selecionadas. Nessa combinação linear, o número de funções é igual ao número de elétrons presente no sistema molecular, sendo os respectivos coeficientes da combinação obtidos através da minimização de um funcional que representa a energia total do sistema. Esse roteiro de cálculo, denominado formulação LCAO-MO [ElemQC] (combinação linear de orbitais atômicos-moleculares) envolve a avaliação de integrais múltiplas, o que resulta na obtenção de um código fonte relativamente lento. Já a etapa de correção do potencial também exige a avaliação de integrais múltiplas, agravando consideravelmente essa limitação.

É importante observar que todo o processo iterativo que define as formulações “ab initio” produz apenas o mapa de densidade eletrônica, e não a sua evolução temporal, que demandaria um esforço computacional praticamente proibitivo. O acoplamento entre os modelos dispensa o emprego de métodos iterativos, reduzindo significativamente o tempo de processamento requerido para fornecer os mapas de densidade ou de potencial ao longo de todo o processo reativo.

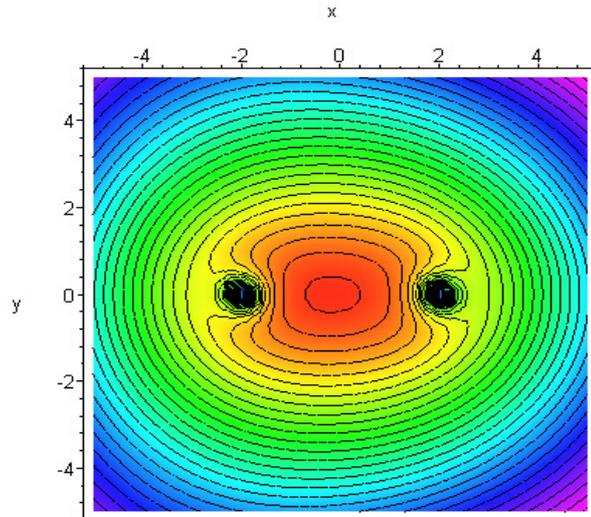
## 5.2 Resultados preliminares das simulações

As simulações desenvolvidas utilizando o modelo acoplado fornecem aos alunos do Ensino Médio a oportunidade de desenvolver uma intuição geométrica não apenas precisa, mas bastante refinada, sobre temas relativamente obscuros e contra-intuitivos que são frequentemente ministrados em Química Orgânica. Um exemplo preliminar particularmente instigante consiste no processo de formação de um carbocátion via efeito indutivo, a partir de uma ligação carbono-carbono totalmente covalente. Nesse cenário, o caráter iônico da ligação se torna progressivamente acentuado, sendo induzida pela aproximação gradual de dois átomos de Hidrogênio. Esse exemplo ilustra de forma clara o rearranjo da nuvem eletrônica em processos reativos, unificando uma série de conceitos e eventos descritos de forma qualitativa em Química clássica:

- Formação de carbocátions;
- Formação de ligações iônicas e covalentes;
- Reorientação de orbitais anisotrópicos;
- Hibridização e valências anômalas;
- Ordens fracionárias de ligação;
- Regra de Markovnikoff.

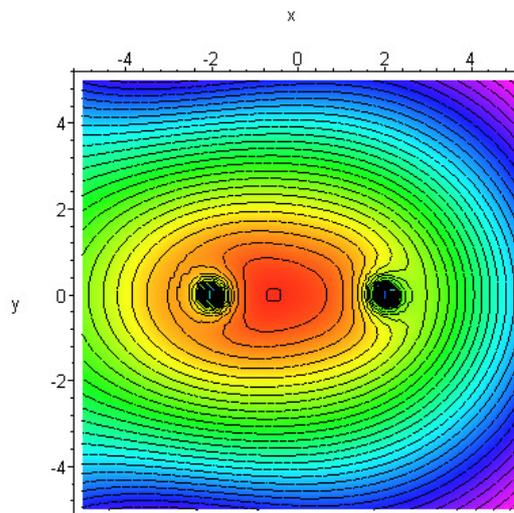
A figura 02 mostra o estado inicial do sistema, exibindo uma nuvem eletrônica entre dois átomos de carbono adjacentes, que caracteriza uma ligação 100% covalente. Essa ligação sofrerá alterações em suas direções preferenciais devido à aproximação de átomos de Hidrogênio, Essas alterações na conformação da nuvem provocam mudanças contínuas de valência, produzindo ligações de ordem fracionária e emulando o processo de hibridização de orbitais, caracterizado pela alteração da sua anisotropia.

Figura 02: Ligação covalente carbono-carbono.



Ao receber radiação ocorre um deslocamento da densidade da nuvem eletrônica para do átomo de carbono da esquerda, como mostra a figura 03.. Essa incidência é provocada pela aproximação de dois átomos de Hidrogênio, formando inicialmente uma ligação de Van der Waals.

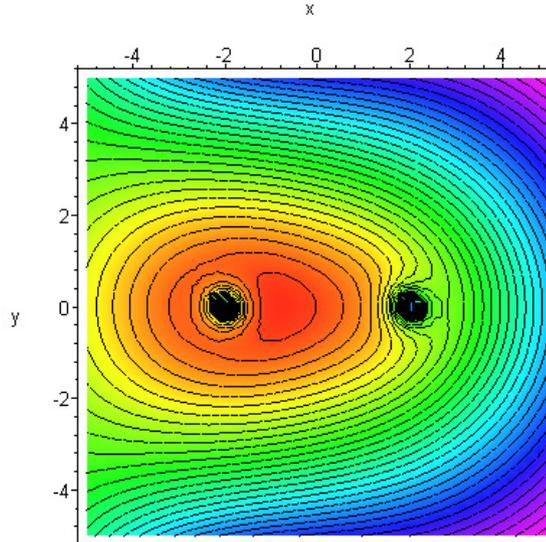
Figura 03: Formação de ligação VdW entre carbono e hidrogênio



Ao aproxima ainda mais os átomos de Hidrogênio do átomo de carbono à esquerda, como visto na figura 04, verifica-se um deslocamento ainda maior da densidade da nuvem eletrônica para as proximidades desse átomo. Essa conformação é típica de

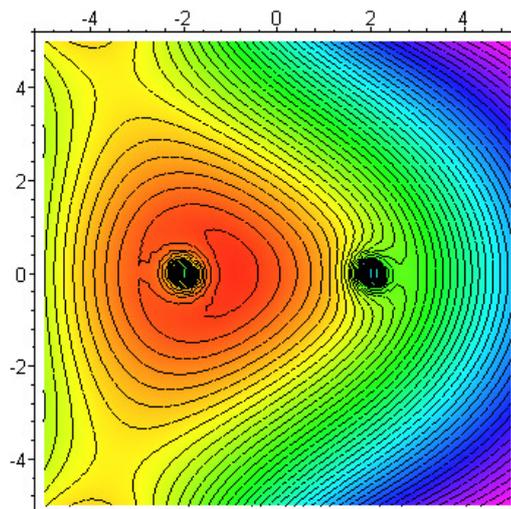
uma ligação iônica, na qual o átomo de Carbono à esquerda representa um ânion, e o da direita faz o papel de um cátion.

Figura 04: Aproximação dos átomos de carbono e hidrogênio



Finalmente, essa aproximação resulta claramente na produção de um carbocátion<sup>2</sup> formado à direita da ligação carbono-carbono, conforme mostrado na figura 05, Esta figura mostra também o aumento da densidade eletrônica, em tons de vermelho, no átomo à esquerda, em função da aproximação de dois átomos de hidrogênio.

Figura 05: Visualização das novas ligas Carbono-Hidrogênio



<sup>2</sup> Em um carbocátion, o carbono deficiente em elétrons está ligado a outros átomos por meio de orbitais do tipo  $sp^2$ , sendo partículas extremamente reativas. Os carbocátions tem uma estrutura trigonal plana com o carbono hibridizado em  $sp^2$  tendo um orbital p vazio.

Embora os efeitos de campo sejam claramente identificados na sequência apresentada, a dinâmica regida pela equação empregada ainda não foi realmente elucidada. A próxima seção apresenta uma análise sumária do processo que descreve a evolução temporal de uma função potencial cuja dinâmica obedece a equação de Klein-Gordon.

### 5.3 A evolução do potencial de interação ao longo do processo reativo

A equação de Klein-Gordon obedece a uma dinâmica relativamente simples, cuja essência pode ser compreendida ao examinar o modelo unidimensional:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \psi - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \psi + \frac{m_0^2 c^2}{\hbar^2} \psi + V\psi = 0 \quad (7)$$

Essa equação pode ser expressa exclusivamente em termos do potencial de interação  $V$ . De fato, a equação auxiliar

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} V - \frac{\partial^2}{\partial x^2} V + \frac{m_0^2 c^2}{\hbar^2} V + \frac{V^2}{2} = 0 \quad (8)$$

e totalmente equivalente à equação (7), desde que o potencial e a função de onda obedeçam à seguinte relação de compatibilidade:

$$\psi = \frac{\partial V}{\partial x} \quad (9)$$

A equivalência entre os modelos pode ser facilmente verificada ao derivar em relação à variável  $x$  a equação expressa em termos do potencial. Uma vez que a derivada em relação a  $x$  comuta com os demais operadores presentes na equação, obtem-se

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left( \frac{\partial V}{\partial x} \right) - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{m_0^2 c^2}{\hbar^2} \left( \frac{\partial V}{\partial x} \right) + V \left( \frac{\partial V}{\partial x} \right) = 0 \quad (10)$$

Substituindo a derivada do potencial em relação a  $x$  pela função de onda, resulta na equação de Klein-Gordon em sua forma original, demonstrando assim a compatibilidade entre os modelos.

A equação auxiliar pode ainda sofrer uma simplificação adicional, ao adotar unidades atômicas [Daudel, Lefebvre, Moser], e isolar a derivada temporal

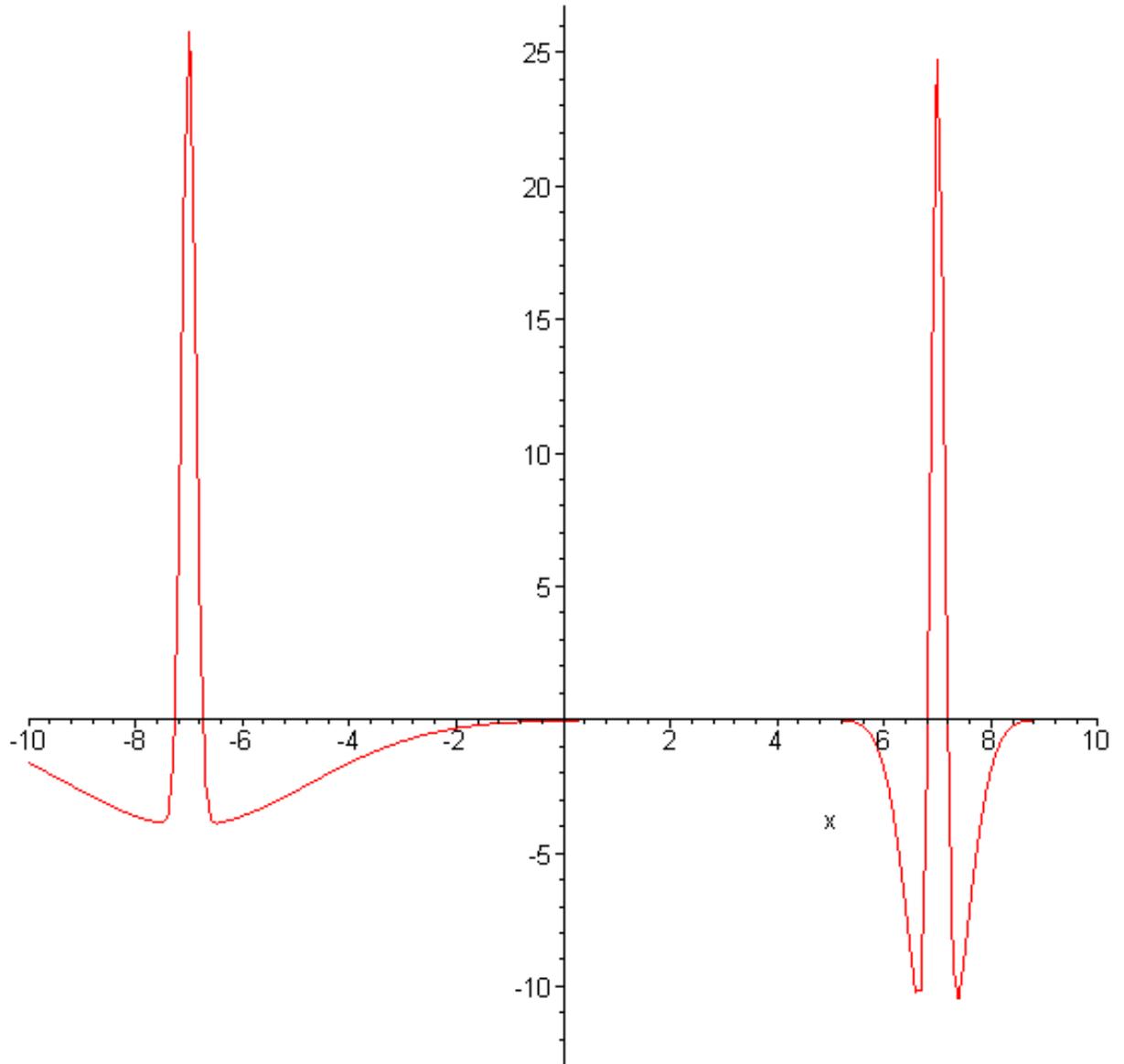
$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} V = \frac{\partial^2}{\partial x^2} V - \frac{V^2}{2} - m_0^2 V \quad (11)$$

Esse modelo informa que há três termos envolvidos na dinâmica do rearranjo da nuvem, por influir na variação temporal de segunda ordem do potencial. O primeiro termo à direita da igualdade, uma derivada espacial de segunda ordem, representa a concavidade local da função que define o potencial. Junto aos pontos de máximo local, a concavidade é negativa, o que contribui para reduzir o valor local do potencial. Já nas vizinhanças dos mínimos locais, onde a concavidade é positiva, o potencial tende a aumentar. Em suma, esse termo atenua curvaturas locais, reduzindo picos e preenchendo cavidades.

O termo quadrático ( $-V^2/2$ ) sempre tende a reduzir o valor local do potencial e o termo massivo ( $m^2V$ ) atua da seguinte forma: aumenta o valor local para amplitudes negativas e reduz esse valor para amplitudes positivas.

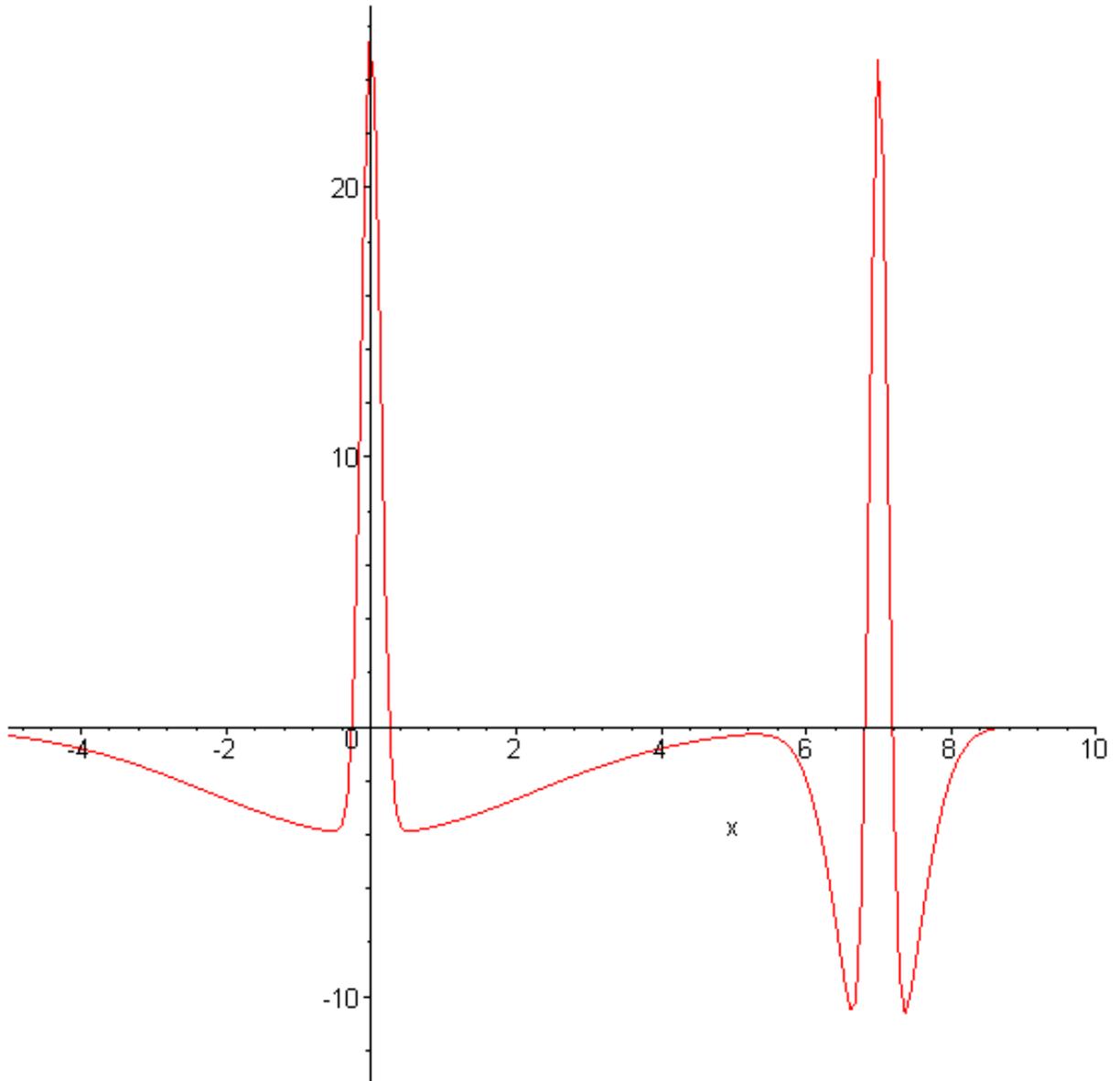
Uma vez estabelecido o efeito individual de cada um dos termos basta então somar suas influências em locais específicos da curva, a fim de obter as variações temporais resultantes. Para átomos isolados, os efeitos se anulam mutuamente, produzindo estruturas estáveis que caracterizam o regime estacionário. Entretanto, quando o átomo é atingido por radiação de determinadas frequências ou mesmo pela presença de um segundo átomo em suas vizinhanças, esse equilíbrio é perturbado, produzindo um efeito transiente que define a dinâmica relativa aos processos de formação e ruptura de ligações. Assim, através da composição qualitativa dos efeitos produzidos pelos termos massivo, quadrático e de curvatura, podem ser elucidados alguns aspectos importantes da dinâmica que governa o processo de rearranjo das nuvens, à medida que dois átomos se aproximam gradualmente. As figuras 6 a 9 mostram a evolução temporal de um sistema diatômico que forma um estado ligado, devido à compatibilidade geométrica de seus respectivos poços de potencial. Quando os átomos ainda estão suficientemente afastados (figuras 6 e 7), não existe qualquer curvatura na linha que liga ambos os átomos. Assim, não ocorrem modificações no formato do potencial, porque a amplitude local também é nula.

Figura 6 – Átomos muito afastados (não há qualquer interação)



Na figura 7, os átomos estão suficientemente próximos para formar um ponto de máximo nas vizinhanças do átomo da direita. Neste ponto a concavidade é negativa e, portanto, o potencial tende a decrescer, como mostram as figuras 8 e 9. O formato da função potencial tende então a estabilizar, uma vez que a concavidade é atenuada, embora seja auxiliada pelo termo quadrático, que também induz o potencial a diminuir. Entretanto, esses dois termos sofrem oposição da parcela massiva, que aumenta o valor local do potencial, e o sistema tende a estabilizar.

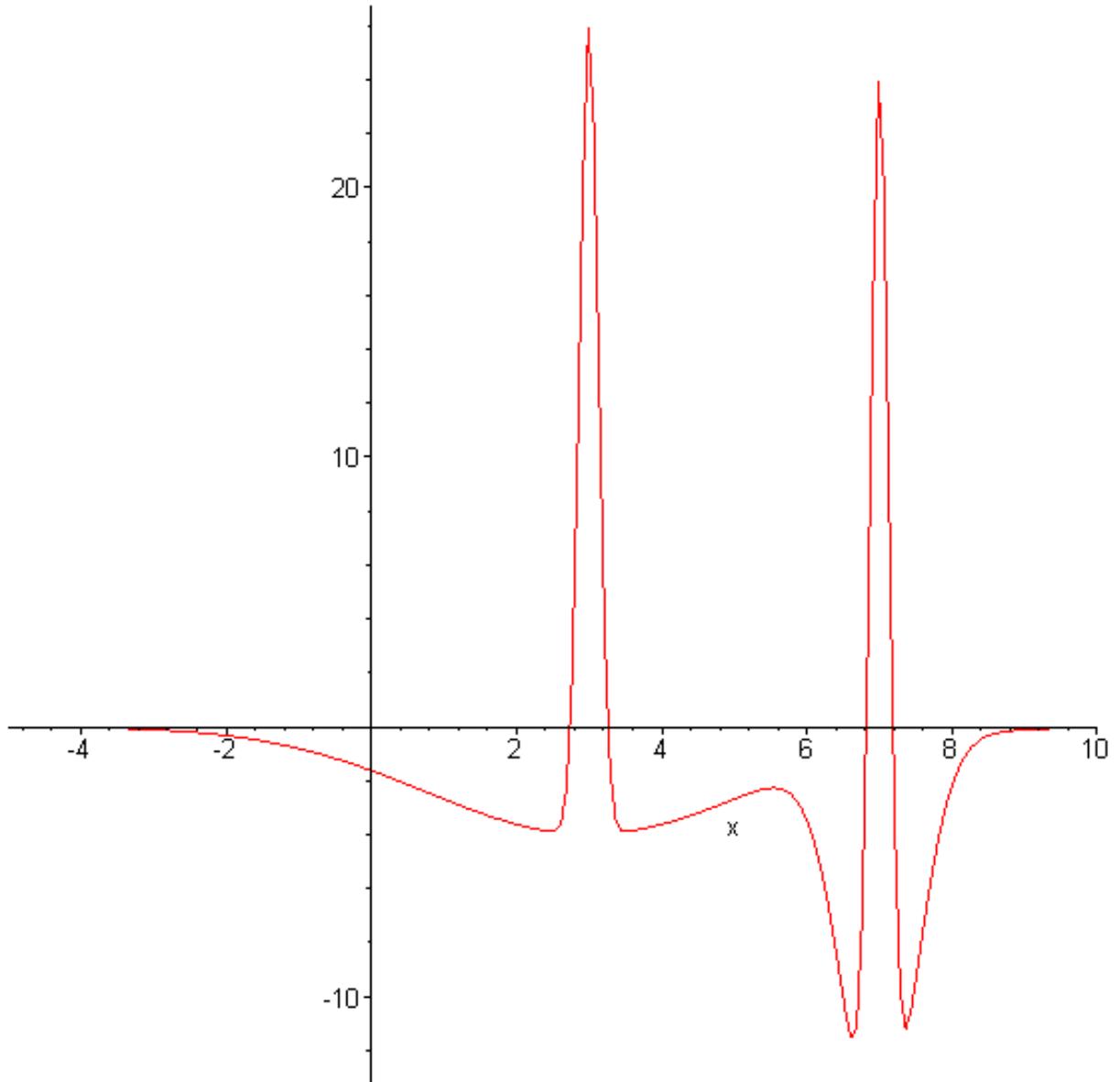
Figura 7 – Átomos relativamente afastados (pequena interação)



O processo assim descrito, mostra a formação de uma ligação iônica entre um metal e um halogênio, que correspondem, respectivamente, aos átomos da esquerda e da direita. Nesse cenário, o halogênio parece atrair a nuvem eletrônica do metal, a partir do momento em que o ponto de máximo local é produzido, como consequência da aproximação entre os átomos. De fato, o surgimento desse ponto crítico constitui uma condição necessária para a formação do estado ligado. Entretanto, essa condição pode eventualmente não ser satisfeita, como mostra a próxima sequência de figuras (10 e 11). Nesta sequência, dois átomos se aproximam, mas não formam

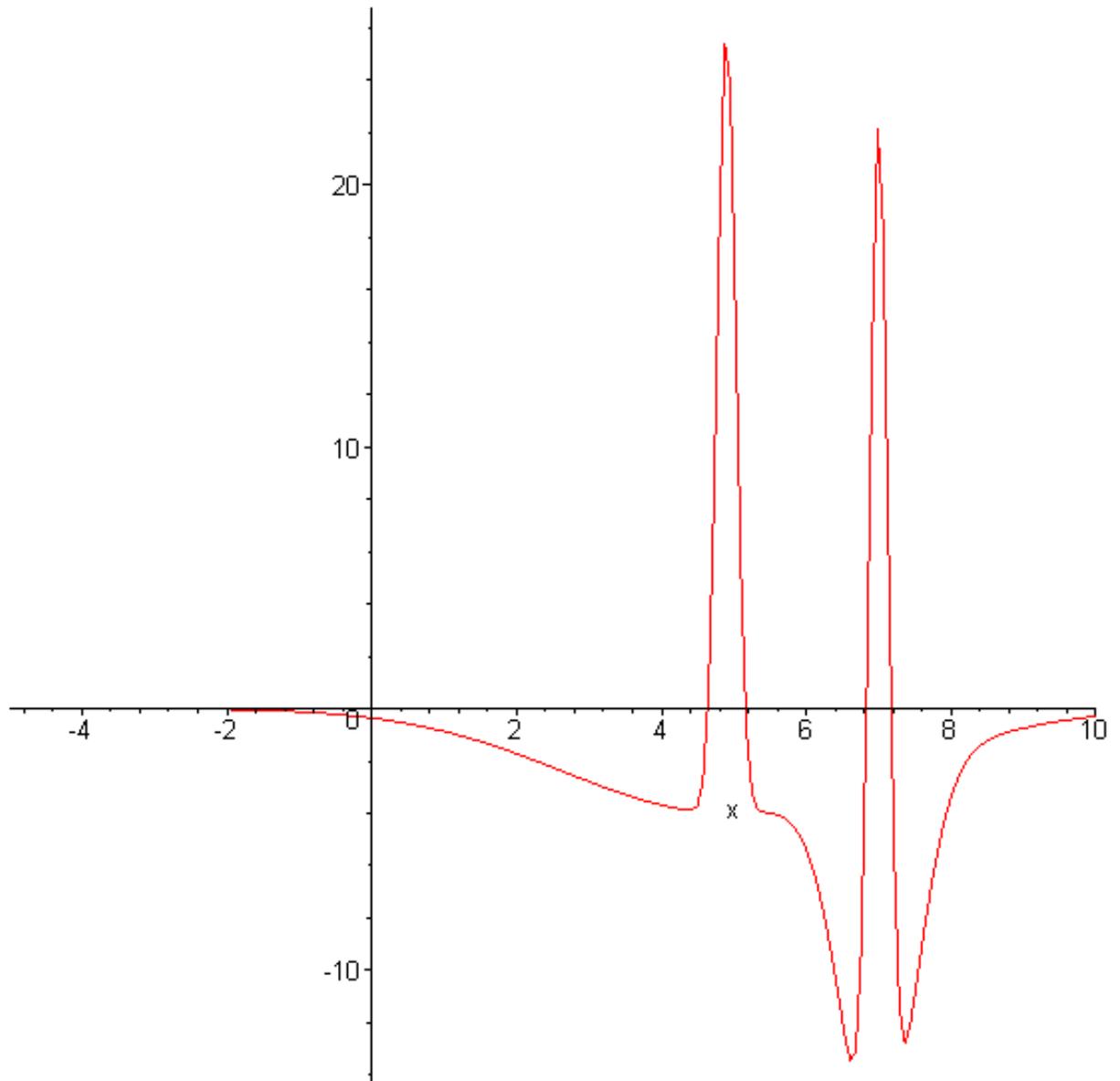
um máximo local, o que não deflagra a formação de um estado ligado, devido ao pequeno alcance dos poços de potencial.

Figura 8 – Início da formação do estado ligado



O processo descrito anteriormente mostra a tentativa mal sucedida de obter um estado ligado entre dois átomos de Neônio, corroborando o fato de não haver ligações entre gases nobres. Contudo, convém lembrar que o modelo unidimensional apresenta apenas um termo relativo à curvatura, de modo que a influência antiligante da concavidade local positiva pode eventualmente resultar subestimada.

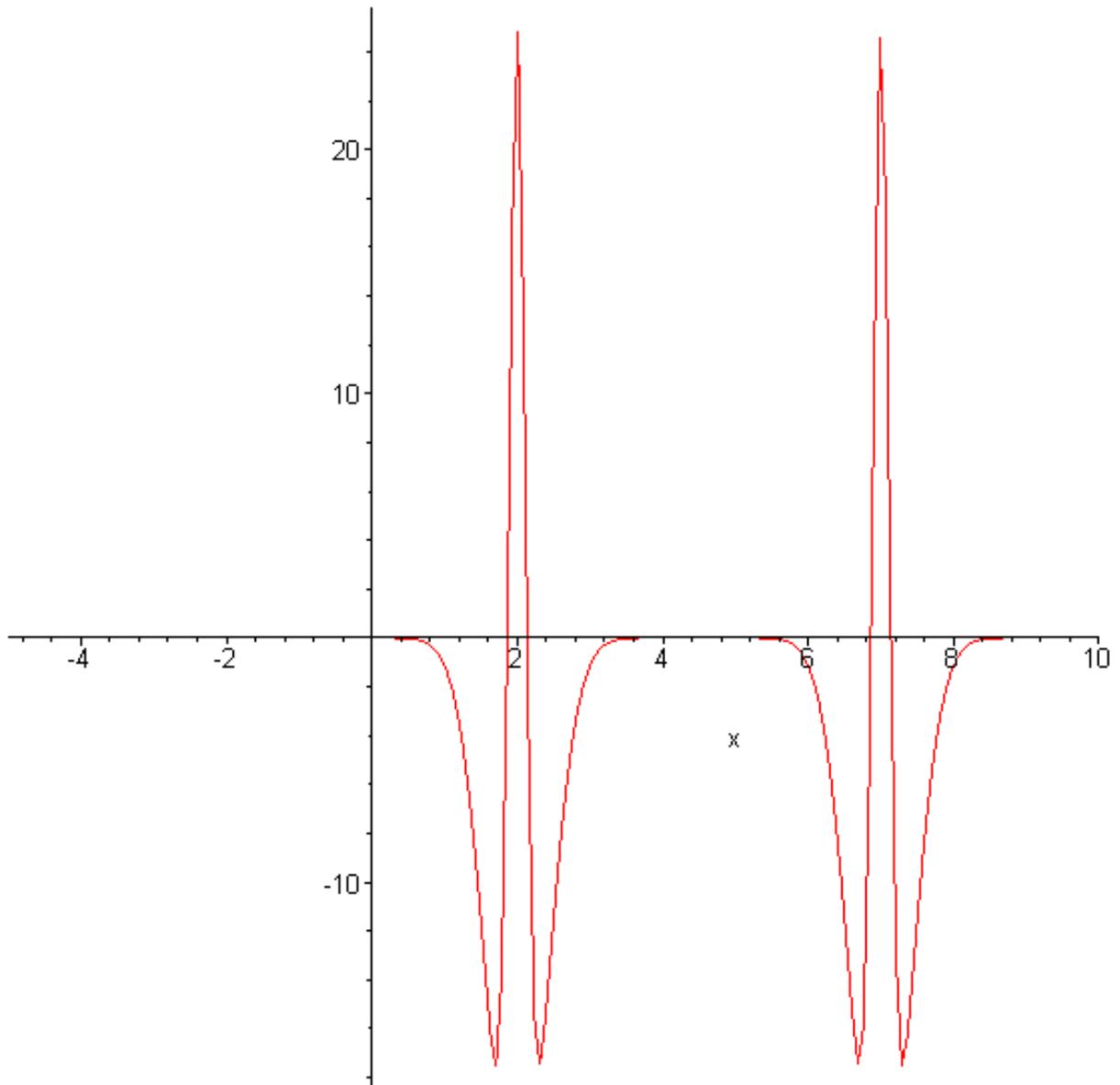
Figura 9 – Formação de ligação iônica



Em outras palavras, é preciso também considerar as influências das derivadas de segunda ordem em relação às variáveis  $y$  e  $z$ , para que o efeito da concavidade local seja estimado de forma correta. Além disso, é importante ter em mente que os valores locais dessas concavidades podem ter sinal oposto, de modo que o efeito da soma de todas as derivadas de segunda ordem não necessariamente resulta maior do que o valor da derivada segunda em relação à variável  $x$ . Assim, o efeito antiligante pode, em alguns casos, inclusive ser atenuado ao invés de amplificado. É necessário,

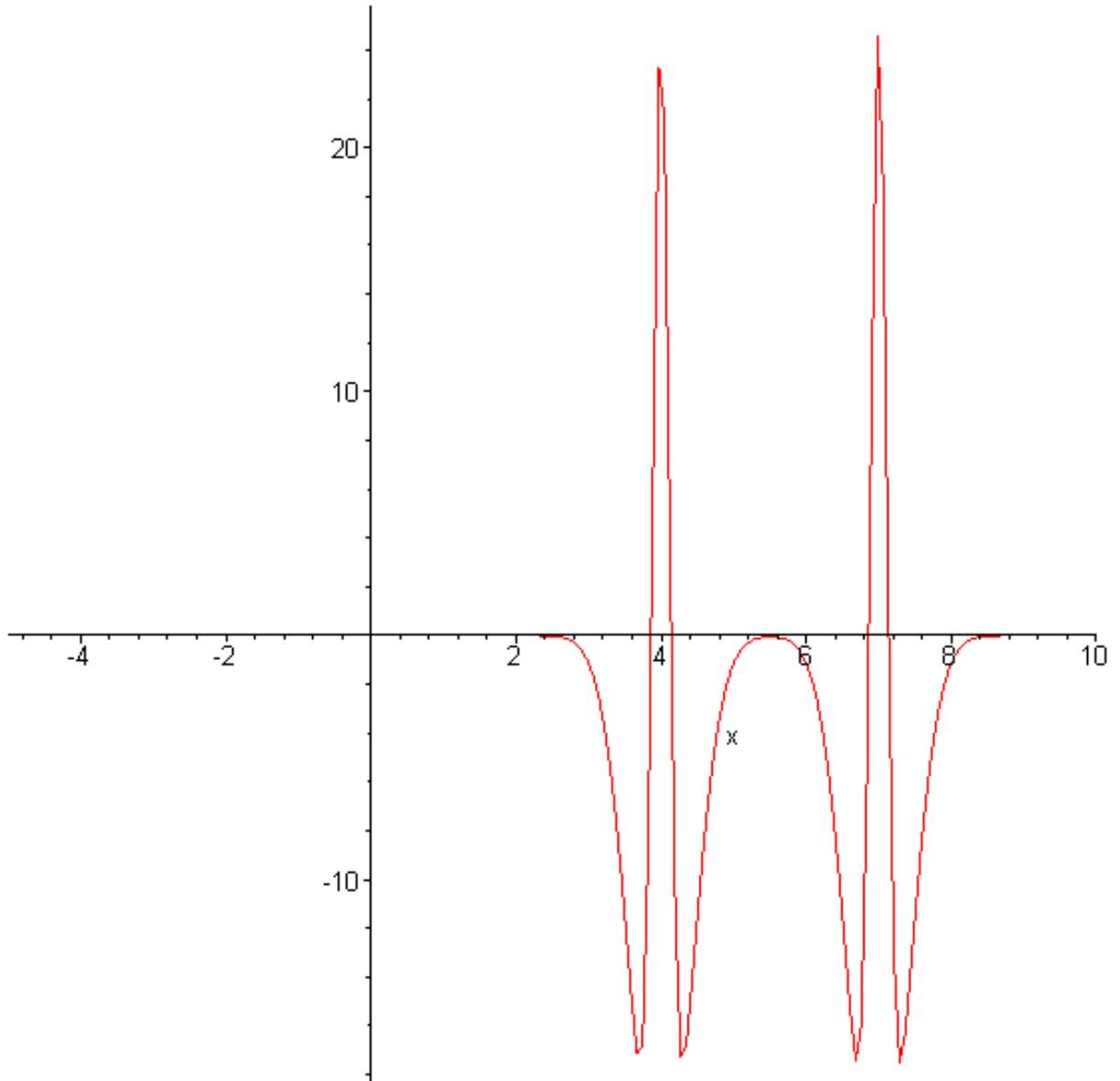
portanto, observar mais atentamente o formato dos poços de potencial nos modelos multidimensionais, a fim de refinar a intuição geométrica.

Figura 10 – Tentativa de ligar dois átomos de gases nobres



Na próxima seção, é apresentada a equação de Klein-Gordon bidimensional autoconsistente, que constitui um refinamento significativo com relação ao modelo unidimensional. Nessa nova equação, não apenas o efeito das concavidades locais se torna mais próximo da realidade, mas a influência da anisotropia dos orbitais passa também a ser considerado, fornecendo uma nova intuição geométrica sobre o processo de catálise.

**Figura 11 - Mesmo muito próximos, os átomos não formam estado ligado**



#### 5.4 O modelo bidimensional

A equação que rege a dinâmica do processo de rearranjo do potencial de campo autoconsistente sofre agora um importante refinamento, através da inclusão da derivada segunda do potencial em relação à variável  $y$ :

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} V = \frac{\partial^2}{\partial x^2} V + \frac{\partial^2}{\partial y^2} V - \frac{V^2}{2} - m_0^2 V \quad (12)$$

Esse termo altera o balanço entre as influências de amplitudes e concavidades locais sobre o processo de evolução temporal da função potencial, tornando o modelo mais realista . Além disso, esse modelo quântico passa a ser acoplado à Lei de Gauss do Eletromagnetismo, dada por

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} V = \frac{\partial^2}{\partial x^2} V + \frac{\partial^2}{\partial y^2} V + \rho \quad (13)$$

produzindo um sistema de equações diferenciais parciais não-lineares, cujas soluções esclarecem alguns tópicos até então considerados particularmente obscuros no que diz respeito à interpretação de alguns processos reativos. Nessa equação, representa a função densidade eletrônica, definida como

$$\rho = \psi^* \psi , \quad (14)$$

onde  $\psi^*$  representa o complexo conjugado da função de onda. A fim de eliminar a função de onda da lei de Gauss, pode ser utilizada uma extensão natural da equação (13) para o modelo bidimensional. Neste caso, as relações entre o potencial de interação, a função de onda e seu complexo conjugado são definidas como

$$\psi = \frac{\partial V}{\partial(x-iy)} \quad (15)$$

e

$$\psi^* = \frac{\partial V}{\partial(x+iy)} \quad (16)$$

A exemplo do ocorrido no modelo unidimensional, a validade dessas relações pode ser facilmente verificada ao derivar (\*) em relação aos novos argumentos, e em seguida comparar com a equação de Klein-Gordon bidimensional em sua forma original.

Ao eliminar a função de onda e seu conjugado na lei de Gauss, torna-se mais conveniente expressar as derivadas espaciais em termos de argumentos complexos. Utilizando a regra da cadeia para reescrever as derivadas presentes nas duas últimas equações em termos dos argumentos  $r = x + iy$  e  $s = x - iy$ , resulta

$$\psi = 2 \frac{\partial V}{\partial s} \quad (17)$$

e

$$\psi^* = 2 \frac{\partial V}{\partial r} \quad (18)$$

Além disso, o laplaciano do potencial, presente na forma não-linear da equação de Klein-Gordon, também pode ser expresso em termos dos novos argumentos:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} V + \frac{\partial^2}{\partial y^2} V = \left[ 2 \frac{\partial}{\partial(x-iy)} \right] \left[ 2 \frac{\partial}{\partial(x+iy)} \right] V = 4 \frac{\partial^2 V}{\partial r \partial s} \quad (19)$$

Assim, as equações parciais não-lineares resultam

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} V = 4 \frac{\partial^2}{\partial r \partial s} V - \frac{V^2}{2} - m_0^2 V \quad (20)$$

e

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} V = 4 \frac{\partial^2}{\partial r \partial s} V + 4 \frac{\partial V}{\partial r} \frac{\partial V}{\partial s} \quad (21)$$

Note-se que a forma estacionária da segunda equação tem solução imediata. Para tanto, basta considerar que a equação

$$4 \frac{\partial^2}{\partial r \partial s} V + 4 \frac{\partial V}{\partial r} \frac{\partial V}{\partial s} = 0 \quad (22)$$

Pode ser reescrita na forma

$$\frac{\partial}{\partial s} \ln \left( \frac{\partial V}{\partial r} \right) = - \frac{\partial V}{\partial s} \quad (23)$$

Integrando em  $s$ , e adicionando o espaço nulo do operador  $\frac{\partial}{\partial s}$ , resulta

$$\ln \left( \frac{\partial V}{\partial r} \right) = -V + u(r) \quad (24)$$

Nesta equação,  $u$  representa uma função arbitrária de seu argumento. Isolando a derivada primeira, obtém-se

$$\frac{\partial V}{\partial r} = w(r) e^{-V} \quad (25)$$

onde  $w$  é a exponencial da função  $u$ , que portanto é outra função arbitrária do argumento  $r$ . Multiplicando ambos os membros por  $e^V$ , vem

$$e^V \frac{\partial V}{\partial r} = w(r) \quad (26)$$

Integrando em  $r$  e adicionando o respectivo espaço nulo, resulta

$$e^V = a(r) + b(s) \quad (27)$$

Nesta equação,  $a$  representa a primitiva de  $w$ , que constitui outra função arbitrária de  $r$ , enquanto  $b$  é uma função arbitrária do argumento  $s$ . Finalmente, isolando o potencial de interação, obtém-se

$$V = \ln[a(r) + b(s)] \quad (28)$$

Esta solução exata é empregada para produzir uma nova solução em regime transiente, obtida diretamente por inspeção:

$$V = \ln[a(s)e^{b(s)t}] \quad (29)$$

Para demonstrar que essa função é solução exata da equação (21), basta considerar que

$$V = \ln[a(s)] + b(s)t$$

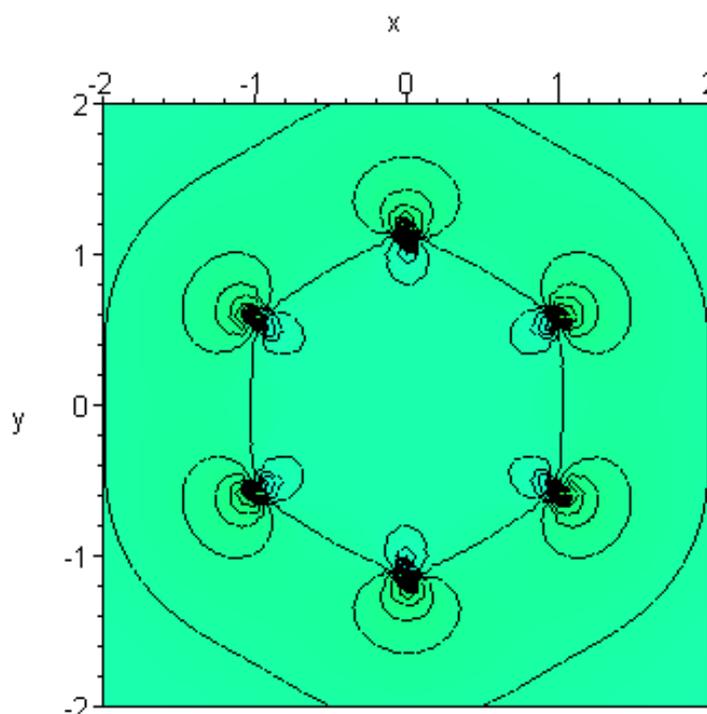
Uma vez que esse potencial não depende do argumento  $r$ , ao substituir  $V$  na equação alvo, os dois últimos termos de (21) resultam automaticamente nulos, restando apenas a derivada temporal de segunda ordem. Entretanto, essa derivada temporal também se anula, pois  $V$  é linear em  $t$ .

Essa solução extremamente simples é utilizada para gerar os mapas de potencial em regime transiente, reduzindo drasticamente o tempo de processamento requerido para a obtenção dos sucessivos estados do sistema ao longo do processo reativo.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Utilizando agora o modelo bidimensional para avaliar a influência dos termos massivo, quadrático e de concavidade, verifica-se que, quando a cadeia não é linear, mas cíclica, o efeito do termo extra não pode mais ser negligenciado. A figura 12 mostra seis átomos de carbono posicionados nos vértices de um hexágono regular, que inicialmente não formam ligações entre si. O modelo transiente é então aplicado sobre essa estrutura, tomada como estado inicial do sistema reativo, a fim de verificar se ocorre a formação de um estado ligado, que caracteriza o anel benzênico. Na figura 13 constata-se que de fato as ligações são formadas, e distribuídas com igual intensidade sobre toda a extensão do anel. O potencial de interação para o anel benzênico, cuja estabilidade deveria ser justificada pela influência conjunta dos res-

Figura 12: Estruturas de ligações entre os carbonos formadores do anel benzênico.

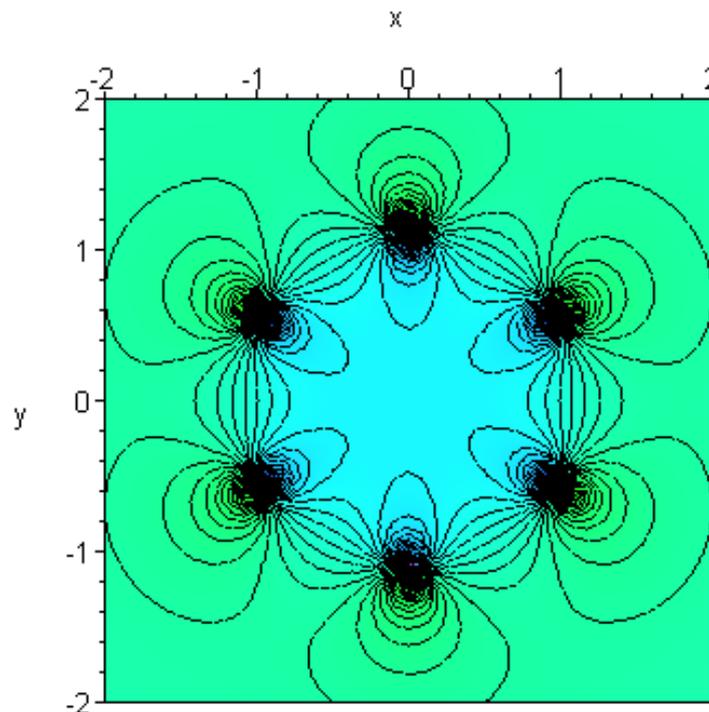


Fonte: do autor.

pectivos valores locais de amplitude e concavidade, pode ser realmente verificada ao examinar outra vista do mesmo arranjo de átomos. Na figura 14, que mostra a molécula em perspectiva, é possível verificar a presença de um poço de potencial pouco profundo, mas de grande alcance, que liga de maneira aproximadamente uniforme todos os átomos de carbono presentes no anel. Note-se que a concavidade

desse poço é praticamente nula em quase toda a sua extensão, exceto nas vizinhanças dos caroços repulsivos, localizados junto aos núcleos. Assim, a influência do operador laplaciano sobre o estado final da função potencial é praticamente desprezível no interior do anel. Nesse caso, a amplitude do poço de potencial em regime estacionário pode ser obtida ao igualar os termos massivo e quadrático, isto é,  $V^2 = -2m^2V$ . condição que resulta em  $V=0$  ou  $V=-2m^2$  . .

Figura 13: Amplitude dos poços de potencial nos carbonos formadores do anel benzênico.

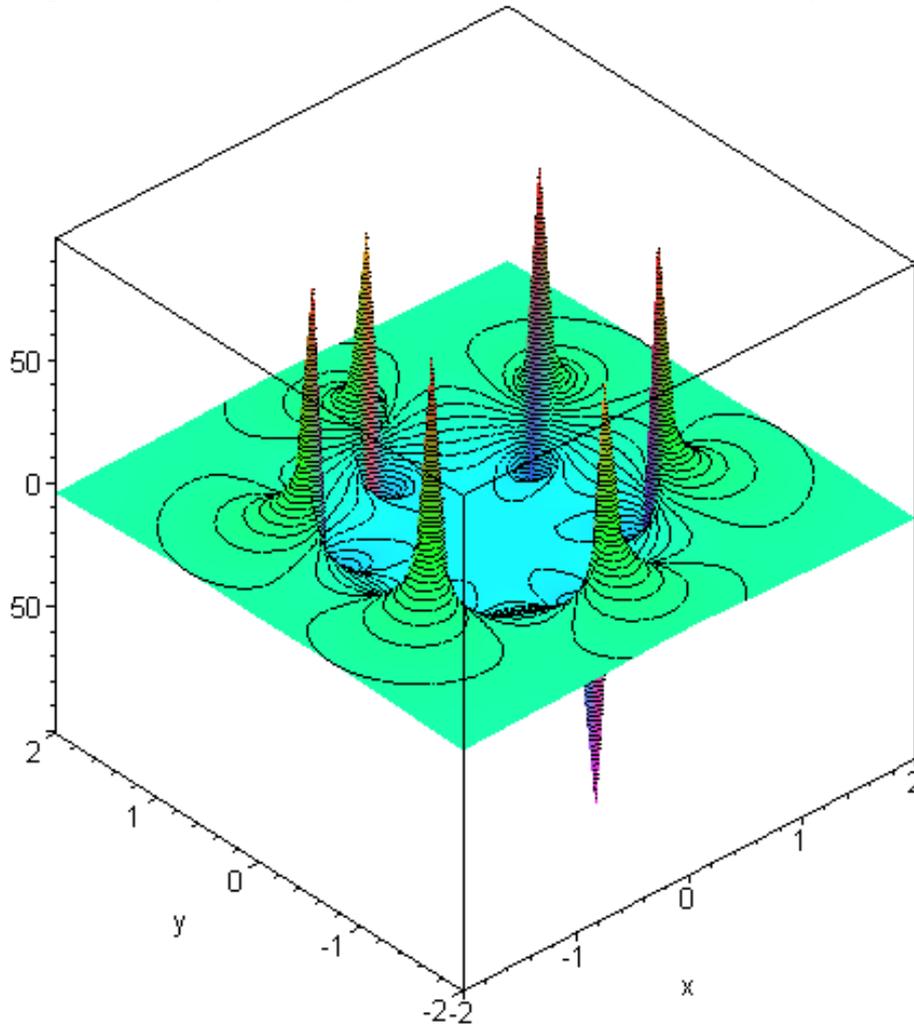


Fonte: do autor.

Esse argumento simples, embora quantitativo, explica a estabilidade do anel benzênico, sem que se faça necessário recorrer a teorias envolvendo estruturas canônicas de ressonância. A geometria intrínseca do poço de potencial justifica plenamente a obtenção de um estado estacionário, o que confere estabilidade a essa estrutura plana. Em particular, as concavidades locais nas direções  $x$  e  $y$  são praticamente opostas, o que constitui uma condição favorável à estabilização da estrutura molecular.

: Ao compreender a influência dos termos quadrático, massivo e de curvatura sobre a dinâmica subjacente ao rearranjo da nuvem eletrônica, torna-se possível unificar alguns princípios básicos de Química clássica. Esses princípios, que regem os processos reativos, podem ser sintetizados em uma única base teórica que

Figura 14: Representação tridimensional dos poços de potencial.



Fonte: do autor.

permite, além de identificar eventuais exceções, refinar consideravelmente a intuição geométrica sobre o tema. Convém lembrar que atualmente esse tema é ainda considerado relativamente obscuro e controverso até mesmo pelos próprios profissionais da área, tais como químicos, engenheiros químicos, biólogos, farmacêuticos e médicos.

## 6.1 A proporção de caráter iônico e a regra de Markovnikoff

Em muitas cadeias carbonadas, o átomo de Carbono mais hidrogenado constitui o candidato mais provável para receber um átomo de Hidrogênio adicional. Essa regra pode ser justificada pela conformação do poço de potencial do Hidrogênio e da própria ligação Carbono-Hidrogênio. Para tanto, é preciso ter em mente que, no processo de formação de uma ligação, o átomo cujo poço de potencial é mais profundo e de menor alcance atua como acceptor de elétrons. Retornando ao exemplo do que ocorre na ligação iônica entre Sódio e Cloro, o ponto de máximo local do potencial, formado junto ao átomo de Cloro, atenua ao longo do tempo. Desse modo, o Cloro tende a drenar o poço de potencial do átomo de Sódio, que é mais raso e cujo alcance é maior. Entretanto, na ligação C-H esse efeito não é tão pronunciado, pois os formatos dos respectivos poços de potencial não diferem tanto a ponto de formar uma ligação iônica. Neste caso, o caráter iônico da ligação é menos acentuado, o que é caracterizado pela formação de um máximo local não tão próximo do Carbono, que atua como acceptor, mas ligeiramente à direita do ponto médio entre os átomos. Ao atrair a nuvem eletrônica com menor intensidade do que o Cloro no exemplo unidimensional, o alcance do poço de potencial do Carbono se torna um pouco maior. Isto possibilita a ligação com um átomo de Hidrogênio adicional que se encontre inicialmente mais distante, aumentando a probabilidade de atrair e capturar esse átomo, ainda que este esteja um pouco mais próximo de outro Carbono menos hidrogenado.

Nesta passagem pode ser verificada a fragilidade do argumento que induz a aceitar a regra de Markovnikoff. Note-se que dependendo da distância que o átomo de Hidrogênio se encontra em relação ao Carbono já hidrogenado, bem como da presença de heteroátomos na cadeia, a concavidade local do poço resultante da ligação C-H pode inclusive desfavorecer a entrada de um novo átomo de Hidrogênio. Esse cenário desfavorável, que caracteriza um comportamento anti-Markovnikoff, é plenamente justificado pelo modelo proposto, que considera não apenas o fato de um dos átomos de Carbono ser mais hidrogenado, mas também considera outros ligantes próximos do suposto sítio ativo para a adição do átomo de Hidrogênio.

## 6.2 Valências anômalas e ordens fracionárias de ligação

O modelo matemático proposto é capaz de prever situações nas quais o número de ligantes é aparentemente incompatível com a suposta valência de um determinado elemento, caracterizando uma violação da regra do octeto. Iniciando pelos chamados gases nobres, cujo poço de potencial é muito profundo e de pequeno alcance, é bastante razoável esperar que essa configuração não venha a favorecer a formação de ligações. Ocorre que, para que ocorra a formação de um ponto de máximo local no potencial, a distância entre um átomo de gás nobre e outros elementos deve resultar tão pequena, que pode provocar inversão de concavidade. A exemplo do que foi mencionado com relação ao modelo unidimensional, ao aproximar dois átomos de Neônio, essa inversão de concavidade não apenas impede a formação de um estado ligado, mas também provoca uma intensa repulsão entre nuvens eletrônicas.. Entretanto, à medida que a massa atômica aumenta, o alcance da respectiva nuvem eletrônica também cresce. Assim,,com base no modelo proposto, seria esperado que átomos de gases nobres mais pesados pudessem eventualmente formar compostos, atuando de forma semelhante aos halogênios, que se comportam como aceptores de elétrons. Isto de fato ocorre com os átomos de Kriptônio e Xenônio, que se comportam como o Cloro, o Bromo e o Iodo, formando Perkriptonatos e Perxenonatos de Sódio e de Potássio.

Uma extensão natural dessa ideia induz a inferir que os átomos de maior peso devam se comportar de forma semelhante aos elementos mais leves de famílias anteriores na tabela periódica. De fato, o modelo prevê que, à medida que a massa atômica aumenta, as famílias deveriam estar dispostas não em colunas, mas em bandas aproximadamente diagonais, o que seria consistente com o formato dos respectivos poços de potencial. Mais uma vez o modelo concorda com os dados experimentais. Lembrando que o Bromo é líquido e o Iodo sólido, torna-se evidente que o número de coordenação cresce com o aumento da massa atômica. Além disso, a família dos semi-metais exemplifica claramente esse argumento, indicando que átomos cujos poços de potencial tenham formato semelhante tendem a se comportar de maneira análoga ao interagir com outros elementos.

### **6.3 A formação de carbânions e carbocátions**

Retornado ao exemplo apresentado na seção 4.2, a formação de íons a partir de ligações covalentes pode ser induzida pela aproximação de átomos adicionais, seguindo essencialmente a mesma dinâmica prevista pelo modelo matemático. Reinterpretando a sequência de mapas em termos das parcelas quadrática, massiva e de concavidade, verifica-se que a analogia permanece válida, ao, observar que essas figuras fornecem, de forma indireta, informações sobre amplitudes e concavidades.

## 7 ANÁLISE DA APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL

A aplicação deste produto educacional ocorreu com a turma 311, que trata-se de uma turma de terceiro ano do Ensino Médio, na Escola Estadual de Educação Básica Comendador Albino Souza Cruz, na cidade de Rolante, estado do Rio Grande do Sul, composta por 26 alunos, que frequentam a escola no turno matutino.

O tema proposto nesta sequência didática, a princípio é um assunto de difícil compreensão para quem nunca teve contato, pois ao se ouvir falar em radiação, sempre a associamos aos seus perigos e aos efeitos nocivos à saúde do ser humano.

Este produto educacional foi aplicado, como citado logo acima, em uma turma de terceiro ano, cujos conteúdos são, nessa etapa do ensino, basicamente eletricidade e magnetismo – eletromagnetismo – sobrando pouco tempo para que desenvolvam os conteúdos relacionados à Física Moderna (Física Relativística, Mecânica Quântica, Física Nuclear e Cosmologia). Tomando como referência o grande leque de conteúdos para serem desenvolvidos no último ano do Ensino Médio, é de suma importância que sejam encontrados meios de se desenvolver estes. Um dos objetivos ao desenvolvermos este Produto Educacional é encontrar modos de tornar estes conteúdos de fácil entendimento conceitual, sem dar tanta importância à matemática mais robusta que é necessária para a sua análise e conseqüentemente entendimento.

Um dos focos no desenvolvimento desse produto educacional está no entendimento a partir da análise das figuras criadas pelo software, cujo código fonte estará disponível nos anexos, para ter importância o aspecto fenomenológico e conceitual e não supervalorizar o aspecto matemático.

No que tange aos conhecimentos prévios dos alunos, podem ser citados os relacionados à química orgânica, as propriedades periódicas e ao eletromagnetismo. A questão: Porquê de relacionar a Química com um trabalho de Física? Se for analisado o aspecto conceitual, a química une os conceitos relacionados ao Eletromagnetismo e à Mecânica Quântica, fazendo uma analogia podemos dizer que a química é a cola (cimento) que une os tijolos da física quântica e do eletromagnetismo.

## 7.1 Aulas 1 e 2

A sequência didática proposta inicia sua aplicação com um questionário investigatório para averiguação dos conhecimentos prévios que os alunos trazem consigo. O questionário está estruturado em 13 atividades organizadas em questões dissertativas, de múltipla escolha e em objetivas.

Ao iniciar da aula, foi feita uma conversa com a turma explicando que ali se iniciava a aplicação de um planejamento que faz parte do Mestrado em Ensino de Física que estou fazendo na Universidade Federal do Rio Grande do Sul e que posteriormente teríamos a visita do prof. Orientador que viria acompanhar a aplicação deste planejamento.

Quando falado em fazer uma avaliação dos conteúdos que já traziam consigo, alguns alunos falaram que não estavam preparados para fazer prova, onde foi explicado que não se trata de uma prova para atribuir uma nota, mas para se mensurar os conhecimentos prévios que já possuem.

Nas primeiras questões, ao serem corrigidas, pode se verificar que a totalidade dos alunos já ouviu falar sobre radiação, dar exemplos, mas entretanto, poucos, aproximadamente 31% dos alunos (8 de 26 alunos) souberam explicar o que é radiação.

Nas questões que estavam relacionadas à saúde (4 a 8) os alunos mostraram mais interesse e, conseqüentemente, também conhecimentos. Apenas houve uma certa dificuldade em identificar os exames que usam a radiação como modo de diagnóstico. Com relação à diferença entre radiação ionizante e não-ionizante, os alunos logo associaram ao aspecto do ganho ou perda de elétrons.

Na questão 9, os alunos mostraram uma certa confusão com a definição de período de meia-vida, sendo que um percentual de 42% fizeram a relação correta (11 de 26 alunos), 35% relacionaram com a situação de que a massa da amostra do material radioativo se reduza a metade (9 de 26 alunos) e a minoria, 23% associou a ideia de reduzir a vida de quem fosse exposto à metade (6 de 26 alunos).

Com relação aos equipamentos cotidianos que utilizam radiação (questão 10), cerca de 90% dos alunos (23 de 26 alunos), associaram a utilização da radiação

somente nos aparelhos de Raios-X e o forno de micro-ondas, que são de conhecimento popular o seu funcionamento com o uso da radiação.

Na questão 11, sobre o interesse em aprender sobre o funcionamento dos aparelhos citados, dos aspectos relevantes à radiação e sobre aprender além do que se vê no Ensino Médio os alunos, praticamente na sua integralidade, 96% (25 de 26 alunos) responderam positivamente a este item.

Sobre o significado dos símbolos relacionados à radiação, contaminação, riscos de explosão, etc, os alunos conseguiram relacionar de modo coerente os símbolos com o respectivo significado, tendo um acerto de 85% dos itens solicitados.

## **7.2 Aulas 3 e 4**

Para dinamizar o andamento da segunda aula, os textos foram impressos e entregues aos alunos, que foram organizados em trios, onde cada um deles recebeu uma cópia do texto, sendo proposto que lessem e organizassem as informações importantes em um texto ou um cartaz para que apresentem aos colegas.

Ao finalizarem as apresentações que cada grupo fez, houve tempo para que as perguntas fossem feitas por parte dos colegas que assistiram à apresentação. Após todos os grupos apresentarem, foi pedido que os grupos construíssem um banner com as ideias principais apontadas em cada texto, para que todos tenham trabalhado todos os textos.

Avaliando a atividade, pôde-se ver o quão produtivo foi a execução da atividade pois, ao trabalharem em grupo, os alunos compreenderam a ideia de adquirir e compartilhar conhecimento, bem como os conceitos relacionados aos textos.

## **7.3 Aulas 5 e 6**

Como as salas de aula possuem material de audiovisual, não se fez necessário o deslocamento dos alunos para a sala de mídias para a apresentação do Prezi, preparado pelo autor deste trabalho, para a explanação sobre o Espectro Eletromagnético. Inicialmente ao apresentar aspectos relacionados às ondas, os

alunos já externaram ter conhecimento sobre o assunto e, entretanto, ao passar as ondas eletromagnéticas, começaram a surgir as primeiras dúvidas que foram sendo respondidas ao longo da apresentação.

Em seguida, ao serem encaminhadas as atividades os alunos puderam optar por realiza-las em duplas ou trios. As atividades realizadas em duplas mostram-se mais efetivas do que as feitas em trio, pois aparentemente perdem mais facilmente o foco na execução das tarefas.

Após acusarem estar prontos, iniciou-se o processo de correção. Pode ser observado que algumas questões que envolvem a aplicação da matemática para a resolução, os alunos tiveram mais dificuldades em realiza-las, sendo que a grande parte, cerca de 62% (16 de 26 alunos) as fizeram, alguns não acertando integralmente a questão, mas partindo de um ponto válido para resolvê-la.

A avaliação desta atividade fica por conta do empenho e na capacidade de se envolverem para conseguirem resolver as questões. Mostrou positivo aumentar o grau de dificuldades nas tarefas, pois mesmo frente a este aumento de exigência.

#### **7.4 Aulas 7 e 8**

Para a realização da atividade foi feito o convite à Professora Doutora Ana Paula Mallmann, Coordenadora do Curso de Física Médica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS – para realizar uma palestra com os alunos sobre os fins pacíficos do uso da radiação, onde os alunos puderam contar com a fala de uma especialista sobre radiações.

A professora Ana Paula, trouxe inúmeras situações onde a radiação é utilizada para fins de segurança, medicinais e de diagnóstico. Ao fazer suas colocações a professora fez a combinação com os alunos para que se sentissem à vontade para perguntarem tudo o que desejarem ou que não tiverem compreendido. A medida que o tempo ia passando, pode ser notado o crescente envolvimento dos alunos com o assunto.

Ao encerrar a fala da professora Ana Paula, os alunos tiraram suas últimas dúvidas e então se agradeceu por sua disponibilidade e sua presteza. Os alunos foram

convidados a falar sobre o conhecimento que adquiriram e então pode ser visto o grau de envolvimento deles com o assunto que foi proposto. Este aspecto pode ser utilizado como o aspecto principal na avaliação da atividade.

Figura 15: Palestra com a Professora Ana Paula Mallmann.



Fonte: do autor.

Obs.:

- 1) Para a realização desta atividade foi chamado também a turma 312 para participar da palestra, em virtude da importância do tema.
- 2) Em função da agenda da palestrante, a atividade 5 foi antecipada e desenvolvida no lugar da atividade 4, que será ministrada na próxima semana.

## 7.5 Aulas 9 e 10

As atividades da aula de hoje iniciam-se com a exibição de três documentários relativamente curtos, cerca de 20 minutos cada, sobre os acidentes nucleares de Chernobyl, de Goiânia e de Fukushima.

Após a exibição dos documentários foi iniciada a apresentação de um Prezi sobre os processos de fusão e de fissão nuclear. Ao longo da apresentação foi oportunizado um espaço para que os alunos possam tirar suas dúvidas e em seguida, inicia-se a resolução dos exercícios que foram propostos para esta etapa.

A avaliação desta atividade está relacionada no grau de envolvimento dos alunos bem como na execução das tarefas e na correção dos exercícios propostos.

## **7.6 Aulas 11 e 12**

Ao iniciarem as atividades referentes a aula de hoje, inicia-se por uma revisão para a conceituação de ligação química, dependência da eletronegatividade no rearranjo das nuvens eletrônicas nos átomos, feito através da análise dos gráficos presentes na sequência didática.

Podem ser vistos e compreendidos, a partir dos gráficos, que a distância entre os átomos influencia no tipo de ligação que será formada, bem como a eletronegatividade. Promover a análise dos gráficos constantes na sequência didática, para, a partir daí compreender o conceito e os mecanismos de reação.

Após a explanação e as conversas sobre o assunto, os alunos farão as atividades propostas e em seguida, se dará a correção.

## **7.7 Aulas 13 e 14**

Para a realização destas aulas, será feito o uso das imagens geradas a partir da aplicação desenvolvida no Maple, para a simulação das dinâmicas das reações químicas.

Ao desenvolver da aula de hoje, os conceitos que, de um modo geral, são de difícil compreensão serão construídos ou reafirmados através das gravuras geradas a partir do sistema desenvolvido para o Maple. Serão abordados temas relevantes como formação de carbocátions e carbânions, regra de Markovnikov, estruturas de ressonância do benzeno, etc.

Como o desenvolver da aula, pode-se notar que a inquietação que os alunos tiveram na primeira vez em que os temas foram abordados, nas aulas ao longo do ano, foi tranquilizada ao ser utilizado este material, pois ao terem o material visual, o conceito fica mais fácil ser elaborado e conseqüentemente compreendido.

Após o encerramento da exposição, foram aplicadas as atividades previstas para esta unidade, que os alunos puderam fazer sem apresentarem grandes dificuldades. Finalizou-se a aula colocando à turma que esta seria a última aula, desta seqüência didática e que para finalizar, na próxima aula seria aplicado uma avaliação, para que se possa mensurar e analisar o progresso com relação aos conceitos apresentados.

## **7.8 Aulas 15 e 16**

A avaliação desta seqüência didática é a parte final deste produto educacional. Para podermos mensurar a aprendizagem, a evolução conceitual será utilizada a avaliação que foi proposta na abertura deste material, aplicada nas primeiras aulas. Será feito um comparativo entre o que foi respondido no início deste trabalho e as respostas atuais.

Para haver um quadro comparativo, foram recolhidas as avaliações de dois alunos X e Y, que obtiveram um percentual de acertos no questionário investigatório para averiguação dos conhecimentos prévios que os alunos traziam consigo. O aluno X obteve um percentual de acertos de 84,38% do total, enquanto que o aluno Y 51,77%. Ao aplicar a seqüência didática, durante as últimas oito semanas, a avaliação foi reaplicada, foram incluídas questões extras sobre o que foi desenvolvido sobre os mecanismos de reação.

Ao serem corrigidas as avaliações, tomaram-se como base os dois alunos, X e Y, tomados como referência, pode ser observado um crescimento do percentual de acertos, ficando a diferença mais evidente no aluno Y, que inicialmente teve uma porcentagem mais baixa de acertos, subindo de 51,77% para 84%, evidenciando um aumento de 62,25%. Para o aluno X, houve também um aumento percentual, de 81,38% para 97%, aumento de 19,19%. A partir desta análise, pode ser compreendido que houve um ganho significativo de conhecimentos, principalmente para os alunos

que tinham uma “quantidade” de conhecimentos prévios menor, pois a diferença percentual entre a porcentagem menor se aproxima da maior.

Quando falamos em aprendizagem significativa, temos que ter em mente dois princípios: primeiramente, o material a ser aprendido deve ter ligação com a estrutura cognitiva do aluno de modo não arbitrário e literal, pois o material deve ter uma forma que facilite a interação com o conhecimento prévio do aluno. Segundo o estudante deve mostrar disposição em relacionar o novo material, potencialmente significativo, com a sua estrutura cognitiva. Sem que estes dois princípios se façam presentes, a aprendizagem significativa não ocorre. Cumpre lembrar que a avaliação dos conhecimentos adquiridos através da aprendizagem significativa deve ser feita partindo de questionamentos que não sejam comuns aos alunos para que ocorra uma transformação dos conhecimentos adquiridos para que não aconteçam respostas mecânicas ou memorizadas.

Podemos agrupar a aprendizagem significativa de três modos:

- a) Aprendizagem Representacional – relação da aprendizagem de símbolos afim de permitir a relação desta com novas outras categorias;
- b) Aprendizagem de Conceitos – relaciona a aprendizagem representacional com vários símbolos;
- c) Aprendizagem Proposicional – envolve a aprendizagem de uma nova ideia que assume a forma de uma proposição sendo assim mais rica de significados do que a própria proposição apresentada.

Ao considerarmos a prática pedagógica docente, a aprendizagem significativa é uma teoria de grande aplicação em sala de aula considerando-se a concepção que é direcionada para este fim. O professor deve identificar quais são os conhecimentos prévios que o aluno possui a fim de compor uma estratégia para alcançar os subsunçores a partir dos conhecimentos potencialmente significativos, promovendo assim a aquisição da estrutura conceitual por meio de significados claros, estáveis.

## 8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

O modelo autoconsistente proposto, obtido a partir da lei de Gauss e da relação entre o potencial de interação e a função de onda na equação de Klein-Gordon, fornece resultados qualitativos consistentes com os princípios da Química clássica, estabelecendo uma base lógica unificada para a interpretação de diversas regras, conceitos e fenômenos cujas conexões não foram estabelecidas até então de forma clara na literatura especializada. Conceitos e efeitos antes considerados de forma essencialmente isolada, tais como formação de carbocátions, formação de ligações iônicas e covalentes, reorientação de orbitais anisotrópicos, hibridização, valências anômalas, ordens fracionárias de ligação, adições Markovnikoff e anti-Markovnikoff são condensadas em um único princípio quantitativo que rege a evolução temporal do potencial de interação ao longo do tempo. Esse princípio geométrico permite estimar variações temporais do potencial a partir de amplitudes e concavidades locais, revelando a ocorrência da formação e do rompimento de ligações, assim como de alterações em sua intensidade e grau de polarização. Essa abordagem visual se torna gradualmente acessível a alunos do ensino médio, à medida que estes absorvem conceitos como amplitude, inclinação e concavidade, tanto para curvas quanto para superfícies.

Ao estabelecer uma intuição geométrica de importância crucial para a compreensão de conceitos como energia e força, os alunos se preparam para ingressar em cursos de graduação, previamente munidos de concepções bastante concretas sobre singularidades, limites e derivadas. Essas concepções facilitam consideravelmente o aprendizado da Matemática, fornecendo motivações legítimas para que seu estudo prossiga em níveis de profundidade cada vez maiores. Ainda que diversos temas em Matemática sejam introduzidos de maneira excessivamente formal e muitas vezes estéril, os alunos cientes de sua importância real e da amplitude de seu horizonte de aplicação. É preciso ter em mente que os estudantes dificilmente serão desencorajados a abandonar estudos que envolvam maior profundidade de inferência lógica, desde que desenvolvam uma visão concreta e estimulante sobre as verdadeiras potencialidades dos temas ministrados em sala de aula. Cabe ao professor fornecer esse estímulo inicial, através do emprego de recursos visuais, analogias e experiências práticas. No caso específico deste trabalho, a interpretação geométrica de equações diferenciais constitui um ponto de partida fundamental para

concretizar e unificar ideias, ao invés de preparar o aluno para cursos de graduação nos quais predomina o excesso de formalismo inconsciente. É necessário considerar que a Matemática não é uma mera ferramenta para obter valores numéricos, mas uma linguagem extremamente evoluída. Essa linguagem permite partir de premissas remotas e chegar a conclusões bastante profundas de forma muito mais eficiente e, rigorosa do que permite o silogismo mais sofisticado que se possa conceber. Ao compreender a dinâmica descrita por uma equação diferencial, o aluno se defronta com uma riqueza excepcional de informações expressa em uma forma compacta e inteligente. Em particular, no, que diz respeito ao estudo dos processos reativos, essa linguagem sucinta e objetiva substitui com grande vantagem uma série de textos extensos, fragmentados e desnecessariamente intimidadores, que são amplamente difundidos no meio acadêmico.

A título de recomendação para trabalhos futuros, poderia ser elaborado um modelo vetorial para suprir a principal deficiência da formulação escalar apresentada. O modelo proposto ainda não é capaz de simular a interação spin-órbita, sendo, portanto, inadequada para a obtenção de espectros realistas de energia. Para tanto, seria necessário acoplar as equações de Dirac às equações de Maxwell não-homogêneas, expressas em termos do potencial vetorial de Maxwell ao invés do campo elétrico e da indução magnética. Embora existam outras alternativas para a obtenção de modelos vetoriais, até mesmo recomendações sobre, esse tema ainda foge ao escopo do trabalho proposto.

## REFERÊNCIAS

1. CRUZ, Cristiano Cordeiro. **A teoria cognitivista de Ausubel**. Disponível em: <[http://www.robertexto.com/archivo3/a\\_teoria\\_ausubel.htm](http://www.robertexto.com/archivo3/a_teoria_ausubel.htm)>. Acesso em 16 jan 2018.
2. EISBERG, Robert e RESNICK, Robert. **Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas**. Rio de Janeiro: Campus, 1979.
3. FONSECA, Martha Reis Marques da. **Química: Meio ambiente, cidadania e tecnologia**. São Paulo: FTD, 2010. V. 3. 1ª Ed.
4. MEDEIROS, Rogério Fachel. **Introdução à Física das radiações. Textos de apoio ao professor de Física**, v.22, nº5, 2011.
5. MOREIRA, Marco Antonio. **Teorias da aprendizagem**. São Paulo: EPU. 1999.
6. \_\_\_\_\_. **A teoria da aprendizagem significativa. Subsídios teóricos para o professor pesquisador no ensino de Ciências**. Instituto de Física, UFRGS, Porto Alegre, 2016. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/~moreira/Subsidios6.pdf>> Acesso em 17 jan 2018.
7. PELIZZARI, Adriana et al. **Teoria da Aprendizagem Significativa Segundo Ausubel**. Rev. PEC, Curitiba, v.2, n.1, p.37-42, jul. 2001-jul. 2002 Disponível em: <<http://portaldoprofessor.mec.gov.br/storage/materiais/0000012381.pdf>> Acesso em 14 jan 2018.
8. SANTOS, Alencar Teixeira dos. **Simulação da Interação entre Partículas e Campos Magnéticos**. 2018. DISSERTAÇÃO (Mestrado em Ensino de Física). Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Tramandaí.

## APÊNDICE A – PRODUTO EDUCACIONAL



**MNPEF** Mestrado Nacional  
Profissional em  
Ensino de Física



Jeferson Albino Fleck

**PRODUTO EDUCACIONAL:  
A INTERAÇÃO RADIAÇÃO-MATÉRIA E OS PROCESSOS REATIVOS:  
UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA O ENSINO MÉDIO.**

Prof. Dr. Jorge Rodolfo Zabadal  
Orientador

Prof. Dr. Ederson Staudt  
Coorientador

Tramandaí, RS  
2020

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>61</b>
<b>ATIVIDADE 1: APLICAÇÃO DO QUESTIONÁRIO INVESTIGATÓRIO .....</b>	<b>66</b>
<b>ATIVIDADE 2: O QUE OS TEXTOS QUEREM REALMENTE DIZER? .....</b>	<b>71</b>
<b>ATIVIDADE 3: O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO .....</b>	<b>82</b>
<b>ATIVIDADE 5: VAMOS CONHECER A HISTÓRIA DOS ACIDENTES NUCLEARES E REFLETIR SOBRE O NOSSO FUTURO? .....</b>	<b>87</b>
<b>ATIVIDADE 6: AS REAÇÕES QUÍMICAS E A INTERAÇÃO COM AS RADIAÇÕES .....</b>	<b>89</b>
<b>ATIVIDADE 7: DENSIDADES ELETRÔNICAS.....</b>	<b>100</b>
<b>ATIVIDADE 8: AVALIAÇÃO.....</b>	<b>112</b>
<b>SOBRE O PRODUTO EDUCACIONAL .....</b>	<b>61</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>125</b>

## INTRODUÇÃO

A construção deste trabalho faz parte do que é proposto pela Sociedade Brasileira de Física (SBF) ao ofertar o Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) e tem por objetivo o desenvolvimento de um Produto Educacional, estruturado na forma de uma Sequência Didática, para o estudo das interações entre radiação e matéria envolvendo também os processos reativos. Para tal, foram desenvolvidas rotinas computacionais, por meio do software de processamento simbólico MAPLE, que tornasse possível a geração de imagens e animações que servem de guia para a consideração dos conceitos pertinentes.

As aulas foram ministradas dentro de uma proposta interdisciplinar, integrando os componentes curriculares correspondentes a física, nos tópicos relacionados de sobremaneira ao eletromagnetismo e mecânica quântica, e a química, nos tópicos relacionados principalmente com as ligações químicas com aspectos ligados a química orgânica.

A execução, em aulas de física e química do ensino médio, correspondeu a 8 atividades totalizando 17 horas aulas. Entretanto, de acordo com o planejamento individual, estas poderão ser desenvolvidas em um período maior ou menor obedecendo, por exemplo, o andamento e a necessidade da turma.

Sobre o ensino de física no ensino médio, este apresenta-se por muitas vezes desarticulado e descontextualizado de conceitos, leis e fórmulas, que por muitas vezes está distanciado da vida, tanto do professor como do aluno, sendo assim desprovido de significado.

O conhecimento das ciências e, neste caso em especial, da física, deve começar pela pergunta, pela inquietação, pela existência de problemas, pela curiosidade e principalmente pela averiguação dos conhecimentos que o aluno traz consigo. Por exemplo, muitos dos conceitos abordados no ensino de Física como força, movimento, temperatura, velocidade, energia, etc., já tem um significado para o aluno, pois são frutos de suas experiências do seu cotidiano. Mesmo que o conceito trazido pelo aluno não coincida com o científico, a construção de um novo conceito implica para o aluno a uma mudança na maneira de olhar, sem que, necessariamente, abandone este conceito trazido por ele, mas que, com o surgimento de situações em

que esses conhecimentos não sejam suficientes para a resolução, o aluno tem que partir para uma atitude investigadora, permitindo assim que avalie novas concepções frente às teorias científicas.

O planejamento do trabalho de sala de aula é a base do processo de ensino-aprendizagem pois, planejando, o professor sabe qual o ponto de partida e o de chegada para cada tema abordado em sua aula.

Buscar que o aluno possa conciliar vivências e dúvidas com a construção de conhecimentos é de suma importância para a significância dos conhecimentos que serão construídos. Quando partimos desta busca, podemos compreender que o ensino de física não pode ficar restrito somente a utilização do livro didático. Temos a necessidade de buscar novas metodologias alternativas que possibilitem ao aluno ter o gosto de aprender, tendo então uma efetiva construção dos novos conhecimentos.

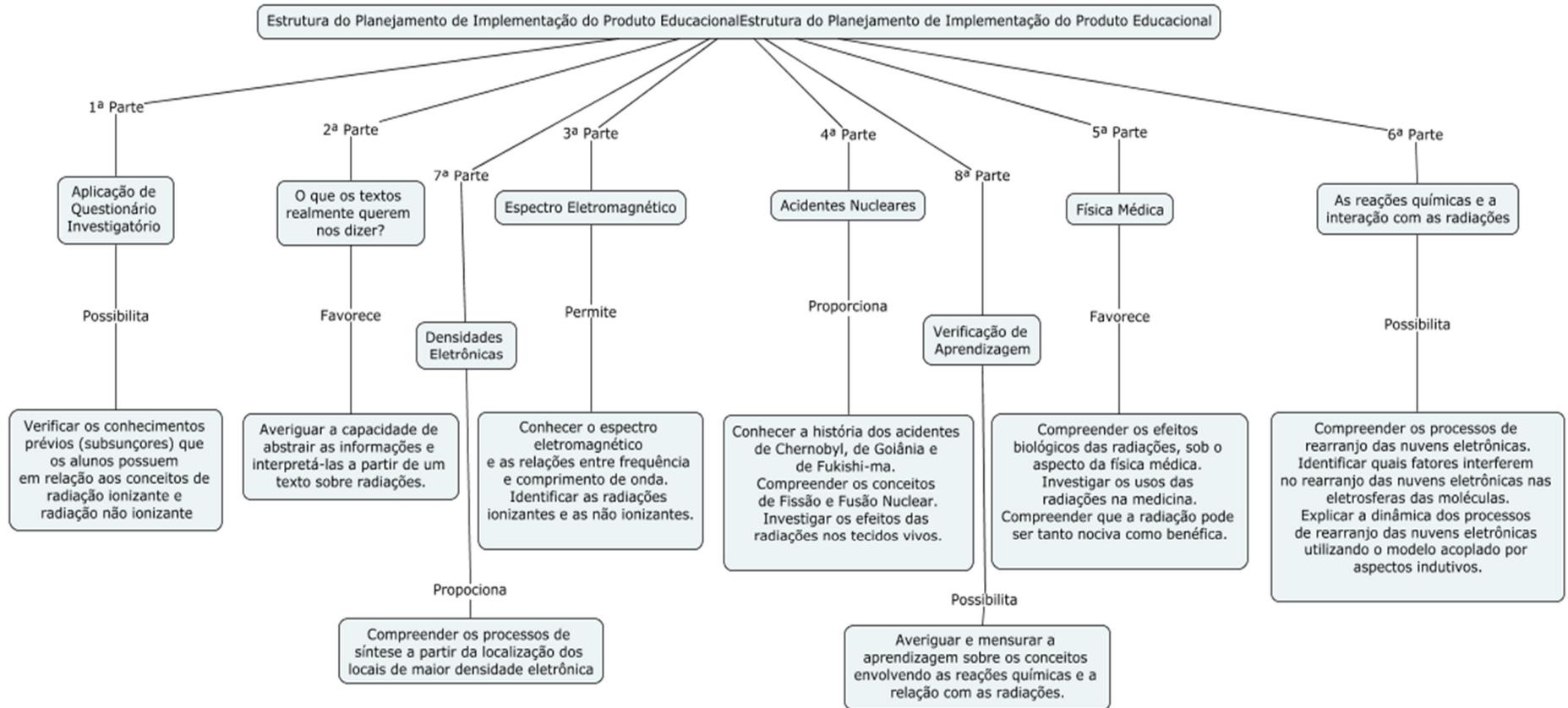
Quadro 01: Estrutura do Planejamento de Implementação do Produto Educacional

Sequência	Períodos	Título	Objetivos	Conceitos Físicos Relacionados	Recursos Didáticos
Atividade 1	1	Aplicação de Questionário Investigatório	Verificar os conhecimentos prévios (subsunçores) que os alunos possuem em relação aos conceitos de radiação ionizante e radiação não ionizante	Radiações ionizantes e radiações não ionizantes.	Exposição oral, folha de questionário, seminário para discussão.
Atividade 2	2	O que os textos realmente querem nos dizer?	Averiguar a capacidade de abstrair as informações e interpretá-las a partir de um texto sobre radiações.	Radiações ionizantes e radiações não ionizantes.	Texto, leitura, interpretação textual.
Atividade 3	2	Espectro Eletromagnético	Conhecer o espectro eletromagnético e as relações entre frequência e comprimento de onda.	Espectro eletromagnético.	Projeter, material impresso, exposição oral, discussão.
Atividade 4	2	Atividade 5: Vamos conhecer a história dos acidentes nucleares e refletir sobre o nosso futuro?	Conhecer a história dos acidentes de Chernobyl, de Goiânia e de Fukushima. Compreender os conceitos de Fissão e Fusão Nuclear. Investigar os efeitos das radiações nos tecidos vivos.	Radiação Ionizante, Fissão e Fusão Nuclear, Efeitos das radiações.	Filme (documentário), Projeter, Notebook,
Atividade 5	2	Física Médica	Compreender os efeitos biológicos das radiações, sob o aspecto da física médica. Investigar os usos das radiações na medicina.	Radiação Ionizante, Fissão e Fusão Nuclear, Efeitos das radiações.	Texto, palestra com uma Física Médica.

			Compreender que a radiação pode ser tanto nociva como benéfica.		
Atividade 6	2	As reações químicas e a interação com as radiações	Compreender os processos de rearranjo das nuvens eletrônicas das moléculas. Explicar a dinâmica dos processos de rearranjo das nuvens eletrônicas utilizando o modelo acoplado por aspectos indutivos.	Ligações químicas, rearranjo das nuvens eletrônicas.	Data-Show, Power-Point, Animações desenvolvidas, Texto.
Atividade 7	2	Densidades eletrônicas	Compreender os processos de síntese a partir da localização dos locais de maior densidade eletrônica.	Energia das ligações químicas.	Projeto, Power-Point, Animações desenvolvidas, Texto.
Atividade 8	2	Acompanhamento da Aprendizagem	Averiguar a aprendizagem sobre os conceitos envolvendo as reações químicas e a relação com as radiações.	Radiações, Ligações químicas.	Folha de avaliação utilizando um questionário objetivo/dissertativo.

Fonte: Fleck, 2018.

Figura 01: Mapa Conceitual da Sequência Didática.



Fonte: Fleck, 2018.

## **ATIVIDADE 1: APLICAÇÃO DO QUESTIONÁRIO INVESTIGATÓRIO**

### Objetivo Geral:

Verificar os conhecimentos prévios que os alunos possuem em relação aos conceitos de radiação ionizante e radiação não ionizante para que sejam organizadas as aulas.

### Objetivos específicos:

Conhecer as concepções prévias dos alunos sobre as radiações.

Apresentar, de um modo contextualizado por meio de questões objetivas e discursivas, os fenômenos da radiação.

### Procedimento:

Para a realização da atividade será entregue um questionário contendo questões envolvendo conceitos associados a radiação. As respostas serão individuais para que o professor possa conhecer os conhecimentos pré-existentes de cada aluno.

### Avaliação:

A aplicação servirá de base para melhorar o material que será aplicado nesta sequência de aprendizagem, levando em conta os conhecimentos prévios que os alunos trazem consigo.

## Questionário

Este questionário é parte integrante do trabalho realizado pelo mestrando Jeferson Albino Fleck, no Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física – MNPEF, realizado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS.

Escola Estadual de Educação Básica Comendador Albino Souza Cruz

Nome: \_\_\_\_\_

Idade: \_\_\_\_\_ Sexo: \_\_\_\_\_

Turma: \_\_\_\_\_

1. Muito se ouve falar em radiação, nos jornais, revistas, televisão, internet, etc. Você sabe o que é radiação?

(  ) Sim.                      (  ) Não.

Pode dar alguns exemplos? \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

2. Quais são os tipos de radiação que você conhece?

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

3. A radiação emitida por determinadas amostras de substâncias provém:

a) da energia térmica liberada em sua combustão.

b) de alterações em núcleos de átomos que as formam.

c) de rupturas de ligações químicas entre os átomos que as formam.

d) do escape de elétrons das eletrosferas de átomos que as formam.

e) da reorganização de átomos que ocorre em sua decomposição.

4. Dos exames por imagem a seguir, qual(is) utiliza(m) a radiação como princípio de funcionamento?

(  ) Ultrassonografia.                      (  ) Tomografia.                      (  ) Raios X.

(  ) Ressonância Magnética.                      (  ) Densitometria Óssea.

(  ) Cintilografia por TEP –Tomógrafo por Emissão de Pósitrons.

5. Você é capaz de explicar a diferença entre raios X, ressonância magnética e cintilografia? Caso afirmativo, explique a(s) diferença(s). \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

6. Você é capaz de diferenciar a radiação ionizante da não ionizante?

\_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

7. Geralmente escutamos que a radiação é nociva, ou seja, traz prejuízo à saúde dos seres vivos (ser humano, animais, plantas). Todo tipo de radiação pode ser enquadrado como nociva? Explique seu ponto de vista.

\_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

8. Você já ouviu falar dos benefícios do uso das radiações? Caso afirmativo, cite-os. \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

9. Em setembro de 1987, ocorreu o maior acidente radioativo no Brasil, na cidade de Goiânia, GO. Dois catadores de materiais recicláveis encontraram em um ferro velho um equipamento de radioterapia, que usava césio 137, e ao perceber que o conteúdo de uma cápsula brilhava no escuro, levaram consigo para mostrar aos seus familiares e conhecidos, guardando o conteúdo no bolso de sua camisa. Com isso, contaminou-se e a todos à sua volta. Como resultado, tiveram, oficialmente, 4 mortes e outras 249 pessoas que ficaram expostas a radiação foram contaminados. Com o acidente produziram-se 13.400 toneladas de lixo radioativo, que foram armazenados em um depósito que formou uma montanha artificial revestida de chumbo e concreto. Estima-se que esse lixo ofereça risco por aproximadamente 180 anos.

*Fonte: G1 Goiás. Césio 30 anos. 10/09/2017.*

- Você sabe o significado da expressão “meia-vida” radioativa? Caso afirmativo, explique o que significa. \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

10. Assinale as opções onde os aparelhos utilizam radiação:

( ) Forno de micro-ondas      ( ) Telefone celular      ( ) Raios X  
 ( ) Telefone sem fio      ( ) Computador      ( ) Rádio      ( ) Televisor

11. É de seu interesse aprender sobre o funcionamento dos aparelhos citados nos exercícios 4 e 10? Justifique: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

12. Comumente nos deparamos com símbolos que nos informam sobre os mais diversos assuntos, desde o trânsito aos perigos de exposição a produtos que oferecem perigo a nossa saúde. Relacione os símbolos a seguir com seus respectivos significados.

 <p>(a)</p>	<p>Risco biológico</p> <p>( )</p>
 <p>(b)</p>	<p>Risco tóxico</p> <p>( )</p>
 <p>(c)</p>	<p>Material corrosivo</p> <p>( )</p>
 <p>(d)</p>	<p>Material inflamável</p> <p>( )</p>
 <p>(e)</p>	<p>Material radioativo</p> <p>( )</p>
 <p>(f)</p>	<p>Alimento irradiado</p> <p>( )</p>
 <p>(g)</p>	<p>Irritante</p> <p>( )</p>
 <p>(h)</p>	<p>Material oxidante</p> <p>( )</p>

 (i)	Radiação Não Ionizante  ( )
 (j)	Risco de Explosão  ( )

13. Dos símbolos acima, quais são pertinentes à radiação?

---

---

## ATIVIDADE 2: O QUE OS TEXTOS QUEREM REALMENTE DIZER?

### Objetivo Geral:

Averiguar a capacidade de abstrair as informações e interpretá-las a partir de um texto sobre radiações.

### Objetivos Específicos:

Conhecer a capacidade dos alunos em abstrair dos textos, tanto didáticos como os informativos, informações sobre radiação e estabelecer a sua relação com os conceitos científicos.

Criar uma noção clara de que a radiação pode trazer riscos como também benefícios e que tal compreensão faz parte do desenvolvimento da cidadania.

### Procedimentos:

Fazer a leitura dos textos selecionados sobre radiações, em grupos, e em seguida proceder para a interpretação e abstração dos conhecimentos relacionados as informações expostas. Cada grupo irá trazer suas concepções a partir da leitura de seu texto para o grande grupo. Propor aos alunos que façam um texto com base nos relatos dos grupos. Orientar que os alunos façam uma leitura bastante atenciosa, tomando nota dos conceitos pertinentes nos textos apresentados.

### Avaliação:

A aplicação desta aula servirá de base, juntamente com o questionário aplicado na aula anterior, para a melhoria do material que será utilizado nesta sequência de ensino, levando em conta os conhecimentos prévios dos alunos.

### Referências:

ALVES, Liria. Acidente com césio-137. Disponível em <https://brasilescola.uol.com.br/quimica/acidente-cesio137.htm> acesso em 27 de maio de 2018.

Revista Galileu. Editora Globo. Tempestade solar atinge a Terra neste sábado. Disponível em <http://revistagalileu.globo.com/Revista/Common/0,,EMI298388->

[17770,00-TEMPESTADE+SOLAR+ATINGE+A+TERRA+NESTE+SABADO.html](#)  
acesso em 26 de maio de 2018.

Revista Hypeness. Há um corpo mumificado de um monge dentro desta estátua de mil anos. Disponível em <http://www.hypeness.com.br/2015/03/ha-o-corpo-mumificado-de-um-monge-dentro-desta-estatuade-mil-anos/> acesso em 26 de maio de 2018.

## **As tempestades magnéticas do dia 15 de março de 2013 e a provável ocorrência de uma supertempestade magnética.**

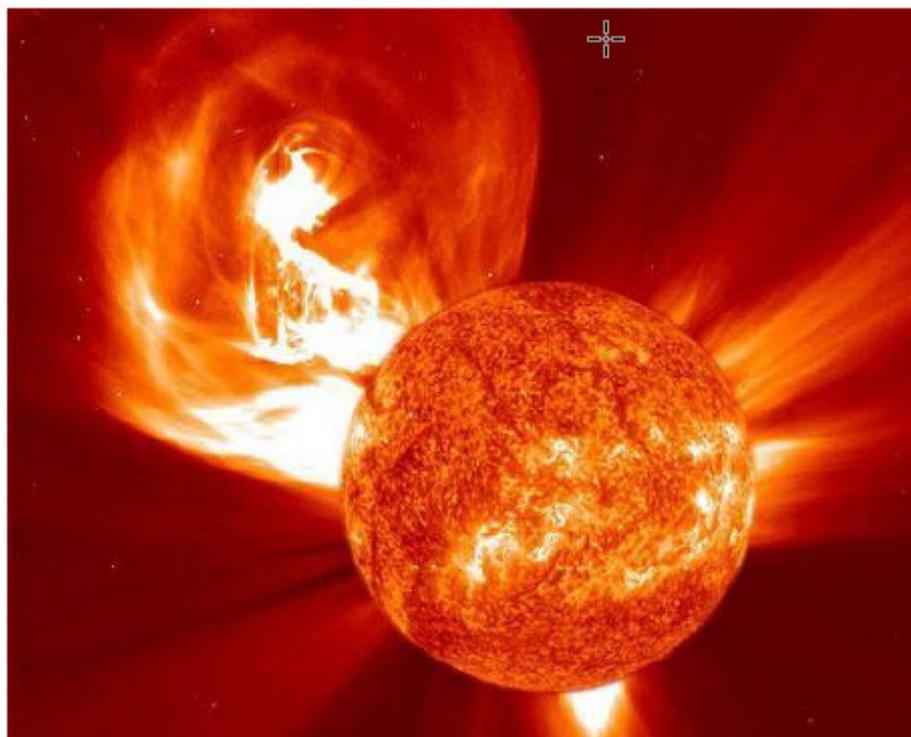
Dr. Clezio Marcos Denardini, Divisão de Aeronomia/INPE

Dr. Joaquim Eduardo Rezende Costa, Divisão de Astrofísica/INPE

Dr. Alisson Dal Lago, Divisão de Geofísica/INPE

Nestas últimas semanas, várias matérias têm veiculado a possibilidade e eventos extremos solares que podem impactar a terra durante o máximo de atividade solar. O INPE não está alheio a isto. Na verdade o Programa Embrace do INPE é o responsável pelo monitoramento e previsão do Clima Espacial no Brasil e publica boletins diários sobre as condições do tempo no espaço, além de realizar reuniões semanais com seus especialistas para discutir sobre os eventos que têm acontecido.

Por exemplo, a semana do dia 11 de março iniciou com baixa atividade solar. Porém, no meio da semana surgiu a região ativa no disco solar, de configuração magnética relativamente complexa (com polaridade magnéticas opostas e próximas), e que acabou sendo responsável por alguns eventos classificados como B e C numa escala que classifica e intensidade em raios X dessas explosões. Na sexta da mesma semana ocorreu um evento M1 (média intensidade). Uma ejeção de massa da coroa solar (similar a da imagem abaixo) ocorreu sexta feira, dia 15/03, e foi associada com esse evento e no dia 17/03 outro evento ocorreu.



Devido a esta sequência de eventos solares, o meio interplanetário ficou com atividade alta. A ejeção de massa da coroa ocorrida no Sol na sexta (dia 15/03) atingiu a Terra com valores da velocidade do vento solar de 750 km/s. Com isso, a componente do campo magnético interplanetário mais importante para que este massa interaja com a terra (componente Bz), ficou muito negativa, com valores próximos a -20 nT (unidades magnéticas). A partir da 3h da manhã (horário de Brasília), o índice geomagnético que mede a perturbação do campo

magnético terrestre ( $K_p$ ) atingiu o valor 6, de uma escala de 0 a 9. Por volta das 10h, observou-se a chegada da nuvem magnética, que manteve a perturbação do campo magnético da Terra.

As análises dos especialistas baseadas nos índices provisórios (sem filtragem definitiva) indicam que a terra passou por uma tempestade magnética moderada (classificação G2). Ou seja, apesar de fenômenos bonitos como as auroras terem sido observados, alguns efeitos sobre os sistemas tecnológicos também devem ter sido experimentados. No caso de tempestades magnéticas de classificação G2, espera-se que os sistemas de transmissão elétrica (linhas de alta tensão, especialmente as de alta latitude) experimentem alarmes do nível de voltagem, e tempestades de longa duração possam causar danos aos transformadores. Além disso, as operações de satélites, como as realizadas pelo INPE, podem requerer ações corretivas da orientação pelos controles de solo; possíveis mudanças no arrasto podem afetar a previsão das órbitas. Com relação às comunicações, os sistemas de propagação em rádio HF podem sofrer com ruídos altos na transmissão, principalmente em altas latitudes (Veja a tabela completa abaixo).

Com relação específica aos eventos extremos, o Programa Embrace do INPE está envolvido em um consórcio internacional de Centros de Alertas Regionais espalhados pelo mundo. No próximo dia 14 de abril os representantes dos diversos países estarão reunidos em Boulder (CO), nos Estados Unidos para tratar deste tema. Ao final deste evento, espera-se estabelecer uma coordenação internacional sobre as ações que devem ser tomadas nos diferentes estágios da ocorrência de um evento solar extremo. Ou seja, como os diversos centros devem agir para avisar as autoridades e o que os diversos sistemas que dependem do Clima Espacial devem fazer, se:

A. uma grande e complexa região ativa solar rapidamente aparecer no disco.

B. uma explosão solar extrema (classificação X20) irromper no Sol, liberando um grande conjunto de partículas (prótons energéticos), junto com uma ejeção de massa da coroa solar com velocidade de 2500 km/s.

C. uma queda na componente do campo magnético interplanetário que seja suficiente para que esta massa interaja com a Terra (componente  $B_z$ ) e chegue a valores próximos a -100 nT (unidades magnéticas).

D. os equipamentos que medem o campo magnético da Terra (magnetômetros) mostrarem uma massiva perturbação, devido a uma tempestade magnética extrema (Classificação G5).

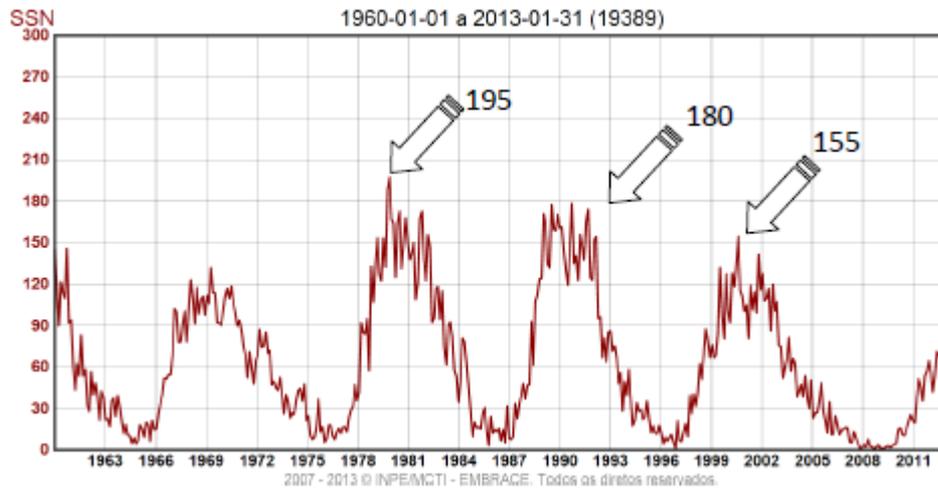
Tabela de Classificação das Tempestades Geomagnética

INDICE	TIPO	DESCRIÇÃO DE POSSÍVEIS EFEITOS
G 5	Extremo	<p>Sistemas Elétricos: problemas gerais de controle de voltagem e problemas com sistemas de proteção, alguma malha do sistema pode experimentar colapso completo ou blackouts. Transformadores podem ser danificados.</p> <p>Operação de satélites: pode experimentar extensiva sobrecarga estática na superfície, problemas com orientação, problemas com o uplink/downlink e rastreamento dos satélites.</p> <p>Outros sistemas: correntes nos dutos metálicos podem atingir centenas de ampéres, propagação em rádio HF (high frequency)</p>

		<p>pode ficar impossível em muitas áreas por um ou dois dias, navegação por satélite pode ficar degradadas por dias, navegação por baixa frequência pode ficar impossível por horas.</p>
G 4	Severo	<p>Sistemas Elétricos: problemas gerais de controle de voltagem e problemas com sistemas de proteção que podem ser acionados erroneamente.</p> <p>Operações de Satélites: pode experimentar sobrecarga estática na superfície e problemas de rastreamento, correções podem ser necessárias para problemas de orientação.</p> <p>Outros sistemas: correntes induzidas nos dutos afetam medidas preventivas, produzem problemas esporádicos na propagação HF, navegação por satélite degrada por horas, navegação por baixa-frequência é perturbada.</p>
G 3	Forte	<p>Sistema elétrico: correções de voltagens podem ser necessárias, alarmes falsos iniciando algum equipamento de proteção.</p> <p>Operação de satélite: sobrecarga estática de superfície nos componentes podem ocorrer, pode ocorrer aumento do arrasto sobre os de baixa órbita, e correções podem ser necessárias para os problemas de orientação.</p> <p>Outros sistemas: podem ocorrer problemas intermitentes na navegação do satélite e navegação em baixa-frequência, comunicação em rádio HF pode ficar intermitente.</p>
G 2	Moderado	<p>Sistema elétrico: sistemas em alta latitude pode experimentar alarmes do nível de voltagem, tempestades de longa duração causam danos aos transformadores.</p> <p>Operação de satélites: podem ser requeridas ações corretivas da orientação pelos controles de solo; possíveis mudanças no arrasto podem afetar a previsão das órbitas.</p> <p>Outros sistemas: propagação em rádio HF pode enfraquecer em altas latitudes.</p>
G 1	Fraco	<p>Sistema elétrico: flutuações fracas na voltagem podem acontecer.</p> <p>Operação de satélite: possível impacto pequeno nas operações.</p> <p>Outros sistemas: animais migratórios são afetados neste nível e em níveis mais altos.</p>

Contudo, apesar de parecerem alarmantes, na verdade todos estes procedimentos são naturais de serem criados em sociedades evoluídas tecnologicamente. E, de fato, ainda não há razões definitivas para se acreditar que um evento extremo possa ocorrer. Na verdade, o número de manchas solares neste ciclo que se iniciou em 2009 está muito abaixo da média histórica. E este número é um

indicativo da atividade do Sol. Veja, por exemplo, no gráfico abaixo do número de manchas solares disponibilizado pelo Programa Embrace do INPE que o número de manchas está abaixo de 90, o que é bem abaixo dos 150 alcançados no ciclo anterior e mais baixos que os 180 ciclos de 1980 e 1990.



Em resumo, há variabilidades no ciclo e na quantidade de explosões solares de ciclo para ciclo e explosões solares são esperadas com maior ou menor número de manchas, ainda mais que estamos em torno do máximo de atividade solar. E, devido a nossa dependência no uso de tecnologias modernas, é prudente contar com sistemas de acompanhamento, previsão e alertas. E, assim proteger os sistemas tecnológicos importantes para nossa sociedade, tais como, o sistema de navegação por satélite (aeronaves, embarcações, plataformas), os sistemas de comunicação, os sistemas de geoposicionamento por satélites (plataformas petrolíferas, agricultura de precisão), os sistemas de distribuição de energia (linha de transmissão, dutos de distribuição de gás natural e petróleo), além dos sistemas de defesa nacional.

São José dos Campos, 28 de março de 2013.

## Há um corpo mumificado de um monge dentro desta estátua de mil anos

No Brasil colonial, chamavam-se de “*santo do pau oco*” as imagens utilizadas como esconderijo para dinheiro e pedras preciosas. No Japão, a “surpresa” escondida em estátuas costuma ser outra. Em uma **escultura tradicional de um Buddha sentado**, o museu holandês **Drents Museum** descobriu, por meio de uma ressonância magnética, nada menos que o corpo de um monge mumificado. A estátua data do **século XI ou XII**.

Para o especialista **Erik Bruijn**, o monge é um **mestre Liuquan** que pertencia a uma escola de meditação chinesa há mais de mil anos. Embora a morte pareça óbvia para todos nós, muitos monges acreditam que ele não esteja morto, mas em um profundo estado de meditação. Até o **século XVIII** era comum a prática da **automumificação** entre os monges. Isso quer dizer que eles adotavam hábitos em vida que faziam o corpo atingir um estado semimorto.

O projeto de automumificação, muito mais complexo que qualquer projeto verão, pode apostar, envolvia **mil dias de uma rigorosa dieta** baseada em frutas e castanhas e a **prática intensa de exercícios físicos** com o objetivo de queimar toda a gordura do corpo. Feito isso, os monges ingeriam **raízes** e um **chá desintoxicante** que expelia parasitas e preservava o corpo. **Cinco anos e meio** depois e com um corpo livre de gordura e toxinas, o monge se recolhia para uma tumba de pedra, onde respirava por meio de um tubo e passava o restante de seus dias meditando. Para avisar que ainda estava vivo, batia um sino e, quando isso deixava de acontecer, os demais monges abriam a tumba para verificar seu estado. Os monges em **estado de graça completa** (vulgo, mortos) eram então expostos em templos.

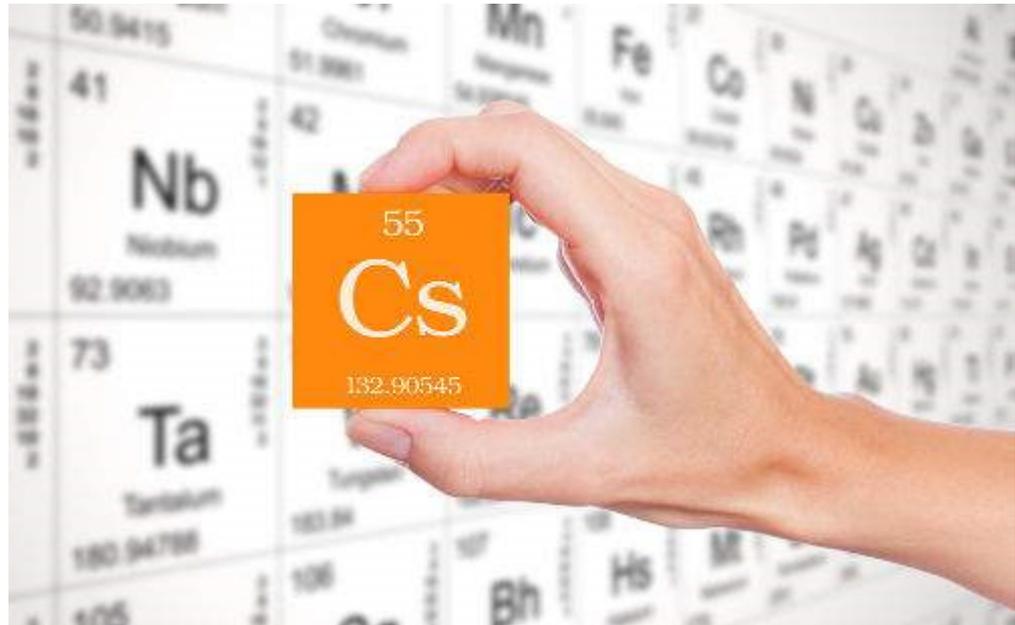
Apenas 24 casos de automumificação foram descobertos e no caso desta estátua, é pouco provável que isso tenha acontecido, embora tenha esta sido a primeira hipótese dos historiadores. Em um exame complexo de endoscopia, foi constatado que em vez de órgãos o monge possuía folhas de textos budistas. A estátua ficará exposta no **Museu de História Natural da Hungria** até maio.





## Acidente com césio-137

O acidente com césio-137 na cidade de Goiânia foi o maior acidente radioativo já ocorrido no Brasil. Ele provocou e ainda provoca sofrimento para muitas pessoas.



Símbolo químico do elemento césio

Um dos maiores **acidentes** com o isótopo Césio-137 teve início no dia 13 de setembro de 1987, em **Goiânia**, Goiás. O desastre fez centenas de vítimas, todas contaminadas por meio de radiações emitidas por uma única cápsula que continha **césio-137**.

### Como tudo começou?

O instinto curioso de dois catadores de lixo e a falta de informação foram fatores que deram espaço ao ocorrido. Ao vasculharem as antigas instalações do Instituto Goiano de Radioterapia (também conhecido como Santa Casa de Misericórdia), no centro de Goiânia, tais homens depararam-se com um aparelho de radioterapia abandonado e tiveram a infeliz ideia de remover a máquina com a ajuda de um carrinho de mão. Eles levaram o equipamento até a casa de um deles.

O maior interesse dos catadores era o lucro que seria obtido com a venda das partes de metal e chumbo do aparelho para ferros-velhos da cidade. Leigos no assunto, não tinham a menor noção do que era aquela máquina e o que havia realmente em seu interior. Após retirarem as peças de seu interesse, o que levou cerca de cinco dias, venderam o que restou ao proprietário de um ferro-velho.

O dono do estabelecimento era **Devair Alves Ferreira**, que, ao desmontar a máquina, expôs ao ambiente 19,26 g de cloreto de césio-137 (CsCl), um pó branco parecido com sal de cozinha que, no escuro, brilha com uma coloração azul.

Ele se encantou com o brilho azul emitido pela substância e resolveu exibir o achado a seus familiares, amigos e parte da vizinhança. Todos acreditavam estar diante de algo sobrenatural e alguns até levaram amostras para casa. A exibição do pó fluorescente ocorreu durante quatro dias, e a área de risco aumentou, pois parte do equipamento de radioterapia também foi para outro ferro-velho, espalhando ainda mais o material radioativo.



Símbolo utilizado para indicar presença de material radioativo

### **Consequências**

Algumas horas após o contato com a substância, vítimas apareceram com os primeiros sintomas da contaminação (vômitos, náuseas, diarreia e tonturas). Um grande número de pessoas procurou hospitais e farmácias reclamando dos mesmos sintomas. Como ninguém imaginava o que estava ocorrendo, tais enfermos foram medicados como portadores de uma doença contagiosa. Dias se passaram até que foi descoberta a possibilidade de se tratar de sintomas de uma Síndrome Aguda de Radiação.

Somente no dia 29 de setembro de 1987, após a esposa do dono do ferro-velho ter levado parte da máquina de radioterapia até a sede da Vigilância Sanitária, é que foi possível identificar os sintomas como sendo de **contaminação radioativa**.

Os médicos que receberam o equipamento solicitaram a presença de um físico nuclear para avaliar o acidente. Foi então que o físico Valter Mendes, de Goiânia, constatou que havia índices de radiação na Rua 57, do Setor Aeroporto, bem como nas suas imediações. Diante de tais evidências e do perigo que elas representavam, ele acionou imediatamente a Comissão Nacional Nuclear (CNEN).

O ocorrido foi informado ao chefe do Departamento de Instalações Nucleares, José Júlio Rosenthal, que se dirigiu no mesmo dia para Goiânia. No dia seguinte, a equipe foi reforçada pela presença do médico Alexandre Rodrigues de Oliveira, da Nuclebrás (atualmente, Indústrias Nucleares do Brasil) e do médico Carlos Brandão da CNEN. Nesse momento, a Secretaria de Saúde do estado começou a realizar a triagem dos suspeitos de contaminação em um estádio de futebol da capital.

### **Medidas adotadas para a descontaminação**

A primeira medida tomada foi separar todas as roupas das pessoas expostas ao material radioativo e lavá-las com água e sabão para a descontaminação externa. Após esse procedimento, as pessoas tomaram um

quelante denominado de “azul da Prússia”. Tal substância elimina os efeitos da radiação, fazendo com que as partículas de césio saiam do organismo pela urina e fezes.

Todavia, isso não foi suficiente para evitar que alguns pacientes viessem a óbito. Entre as vítimas fatais, podemos citar a menina **Leide das Neves**, seu pai Ivo, Devair e sua esposa, Maria Gabriela, e dois funcionários do ferro-velho. Posteriormente, mais pessoas morreram vítimas da contaminação com o material radioativo, entre eles funcionários que realizaram a limpeza do local.

O trabalho de descontaminação dos locais atingidos não foi fácil. A retirada de todo o material contaminado com o césio-137 rendeu cerca de 6000 toneladas de lixo (roupas, utensílios, materiais de construção etc.). Tal lixo radioativo encontra-se confinado em 1.200 caixas, 2.900 tambores e 14 contêineres (revestidos com concreto e aço) em um depósito construído na cidade de Abadia de Goiás, onde deve ficar por aproximadamente 600 anos.

#### **Punições aos culpados e assistência às vítimas**

No ano de 1996, a Justiça julgou e condenou por homicídio culposo (quando não há intenção de matar) três sócios e funcionários do antigo Instituto Goiano de Radioterapia (Santa Casa de Misericórdia) a três anos e dois meses de prisão, pena que foi substituída por prestação de serviços.

Atualmente, as vítimas reclamam da omissão do governo para a assistência tanto médica como de medicamentos. Para tentar resolver a situação, eles fundaram a associação de Vítimas Contaminadas por Césio-137 e lutam contra o preconceito ainda existente.

**O acidente com Césio-137 foi o maior acidente radioativo do Brasil e o maior do mundo ocorrido fora das usinas nucleares.**

Por Líria Alves  
Graduada em Química

### ATIVIDADE 3: O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

Objetivo Geral:

Conhecer o espectro eletromagnético e as relações entre frequência e comprimento de onda.

Objetivos Específicos:

Construir o conceito de onda e a diferença entre onda mecânica e onda eletromagnética.

Compreender as relações entre frequência, comprimento de onda e energia.

Identificar as radiações ionizantes e as não ionizantes.

Averiguar os usos pacíficos para as radiações.

Fazer a resolução de problemas com base nos conceitos abordados e também envolvendo equações matemáticas.

Procedimentos:

Para o desenvolvimento desta atividade será utilizado material audiovisual consistindo em uma apresentação em Prezi, elaborada pelo autor, com apoio de vídeo disponível na plataforma do Youtube. Disponível em

Apresentação Prezi:

[http://prezi.com/obmajlldqobu/?utm\\_campaign=share&utm\\_medium=copy&rc=ex0share](http://prezi.com/obmajlldqobu/?utm_campaign=share&utm_medium=copy&rc=ex0share)

Vídeo Youtube sobre ondas eletromagnéticas e a experiência de Hertz:

<https://youtu.be/F2CNirgu8EQ>

Após serão feitas as atividades do livro didático baseadas na execução e resolução dos exercícios propostos.

26) Recentemente, tem-se falado muito sobre os possíveis danos que o uso contínuo de aparelhos celulares pode trazer ao ser humano. Por sua vez, muitas pessoas que

já utilizaram o celular encostado à orelha, por um tempo suficientemente longo, perceberam que a região em torno desta se aqueceu. Isso se explica pelo fato de que

A) o celular absorve ondas eletromagnéticas, que são transformadas em radiação ultravioleta e aquecem os tecidos da região da orelha.

B) o celular emite ondas sonoras, as quais são absorvidas pelos tecidos da região da orelha, aquecendo-a.

C) o celular emite ondas eletromagnéticas, as quais são absorvidas pelos tecidos da região da orelha, aquecendo-a.

D) o celular absorve ondas sonoras, que são transformadas em radiação infravermelha que aquecem os tecidos da região da orelha.

Texto para as questões 27 e 28.

A pele humana é sensível à radiação solar, e essa sensibilidade depende das características da pele. Os filtros solares são produtos que podem ser aplicados sobre a pele para protegê-la da radiação solar. A eficácia dos filtros solares é definida pelo fator de proteção solar (FPS), que indica quantas vezes o tempo de exposição ao sol, sem o risco de vermelhidão, pode ser aumentado com o uso do protetor solar. A tabela seguinte reúne informações encontradas em rótulos de filtros solares.

<b>Sensibilidade</b>	<b>Tipo de pele e outras características</b>	<b>Proteção recomendada</b>	<b>FPS recomendado</b>	<b>Proteção a queimaduras</b>
Extremamente sensível	Branca, olhos e cabelos claros	Muito alta	FPS $\geq$ 20	Muito alta
Muito sensível	Branca, olhos e cabelos próximos do claro	Alta	$12 \leq$ FPS $<$ 20	Alta
Sensível	Morena ou amarela	Moderada	$6 \leq$ FPS $<$ 12	Moderada
Pouco sensível	Negra	Baixa	$2 \leq$ FPS $<$ 6	Baixa

PROTESTE, ano V, n. 55, fev./2007 (com adaptações)

27 (Enem) As informações acima permitem afirmar que

a) as pessoas de pele muito sensível, ao usarem filtro solar, estarão isentas do risco de queimaduras.

- b) o uso de filtro solar é recomendado para todos os tipos de pele exposta à radiação solar.
- c) as pessoas de pele sensível devem expor-se 6 minutos ao sol antes de aplicarem o filtro solar.
- d) pessoas de pele amarela, usando ou não filtro solar, devem expor-se ao sol por menos tempo que pessoas de pele morena.
- e) o período recomendado para que pessoas de pele negra se exponham ao sol é de 2 a 6 horas diárias.

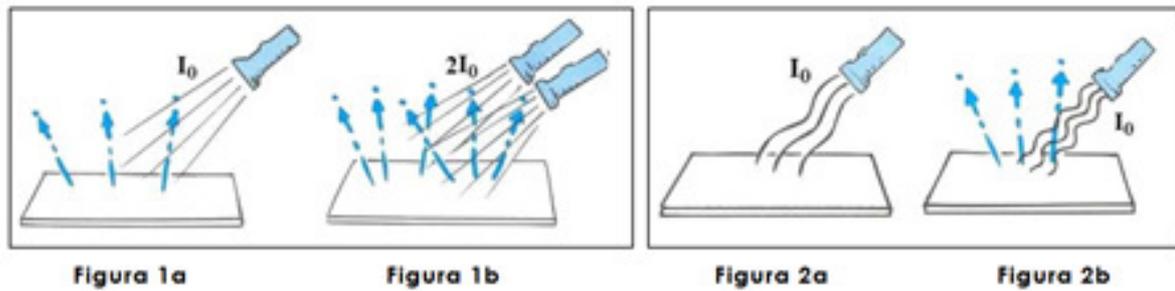
28 (Enem-adaptada) Uma família escolheu a praia para uma temporada de férias. Fazem parte da família um garoto de 4 anos de idade, que se recupera de icterícia, e um bebê de 1 ano de idade; ambos com pele e olhos claros. Os pais concordam que os meninos devem usar chapéu durante os passeios na praia. Entretanto, divergem quanto ao uso do filtro solar. Na opinião do pai, o bebê deve usar filtro solar com FPS  $\geq 20$  e o seu irmão não deve usar filtro algum porque precisa tomar sol para se fortalecer. A mãe opina que os dois meninos devem usar filtro solar com FPS  $\geq 20$ . A situação apresentada, comparada à opinião da mãe, a opinião do pai é

- a) correta, porque ele sugere que a família use chapéu durante todo o passeio na praia.
- b) correta, porque o bebê tem a pele mais sensível que a de seu irmão.
- c) correta, porque o filtro solar com FPS = 20 bloqueia o efeito benéfico do sol na recuperação da icterícia.
- d) incorreta, porque o uso do filtro solar com FPS = 20, com eficiência moderada, evita queimaduras na pele.
- e) incorreta, porque é recomendado que pessoas com olhos e cabelos claros usem filtro solar com FPS = 20.

36. No final do século XIX, vários pesquisadores perceberam que a luz era capaz de ejetar elétrons quando incidia em superfícies metálicas. Esse fenômeno, que ocorre sob certas condições, foi chamado de efeito fotoelétrico. A Figura **1a** mostra luz policromática de intensidade  $I_0$ , cujos fótons possuem energia entre 2,0 eV e 6,0 eV incidindo sobre uma superfície metálica. Observa-se que, dessa superfície, são ejetados elétrons com energia cinética máxima,  $E_{Cmax}$ . A Figura **1b** mostra, também, luz policromática de intensidade  $2I_0$ , cujos fótons possuem energia entre 2,0 eV e 6,0 eV incidindo sobre a mesma superfície metálica. Observa-se, ainda, que também são ejetados elétrons com energia cinética máxima,  $E_{Cmax}$ .

A Figura **2a**, por sua vez, mostra luz monocromática de intensidade  $I_0$ , cujos fótons possuem energia de 3,0 eV incidindo sobre a mesma superfície metálica. Nesse caso, não se observam elétrons ejetados da superfície. Por outro lado, a Figura **2b** mostra luz monocromática de intensidade  $I_0$ , cujos fótons possuem energia de 6,0

eV incidindo sobre a mesma superfície metálica. Nesse caso, observam-se elétrons sendo ejetados da superfície.



Com base na teoria de Einstein para o efeito fotoelétrico,

a) explique por que a energia cinética máxima dos elétrons,  $E_{Cmax}$ , independe da intensidade da luz policromática incidente;

b) explique por que, para essa superfície metálica, o efeito fotoelétrico ocorre apenas quando incide luz cujos fótons possuem energia de 6,0 eV.

37 Indique a alternativa falsa:

A) As leis da física clássica (ou newtoniana) se aplicam ao movimento de corpos mensuráveis ("grandes") e com pequenas velocidades.

B) A física moderna surgiu no final do século XIX e início do século XX, principalmente com os trabalhos de Max Planck e Albert Einstein, que explicavam fenômenos que não podiam ser entendidos com as leis da física clássica.

C) A teoria da relatividade descreve com maior precisão o movimento de corpos com altas velocidades, próximos à velocidade da luz.

D) Fazendo uma aproximação para as velocidades pequenas na teoria da relatividade não é possível retornar às leis da física clássica

E) Para explicar o efeito fotoelétrico, Albert Einstein utilizou o conceito de quantização da energia luminosa ("quantum de luz") apresentada por Max Planck.

38) Em um átomo, o primeiro nível, ocupado por um elétron, tem energia  $E_1 = - 2,6 \times 10^{-19} \text{ J}$  e o segundo, desocupado, tem energia  $E_2 = - 1,3 \times 10^{-19} \text{ J}$ . Ao ser iluminado com luz monocromática, de determinada frequência, esse átomo absorve um fóton e, com isso, o elétron passa do primeiro nível para o segundo. Sabe-se que o valor da constante de Planck é de  $6,6 \times 10^{-34} \text{ Js}$  descrita, a frequência da luz incidente no átomo é de, aproximadamente,

A)  $1 \times 10^{14} \text{ Hz}$

- B)  $2 \times 10^{14}$  Hz
- C)  $3 \times 10^{14}$  Hz
- D)  $4 \times 10^{14}$  Hz

**Avaliação:**

A avaliação desta aula consistirá na participação dos alunos, tanto durante a explanação com uso do material visual, como na resolução dos exercícios.

**Referências:**

**Descoberta das ondas de rádio – Hertz e Maxwell** disponível em <https://youtu.be/FYArBYI9V6o> acesso em 14.06 2018.

GUIMARÃES, Osvaldo. PIQUEIRA, José Roberto. CARRON, Wilson. **Física: Eletromagnetismo e Física Moderna**. São Paulo: Ática. V.3. 2. ed.

## **ATIVIDADE 5: VAMOS CONHECER A HISTÓRIA DOS ACIDENTES NUCLEARES E REFLETIR SOBRE O NOSSO FUTURO?**

### Objetivo Geral:

Conhecer os conceitos relacionados à fissão e fusão nuclear a partir dos documentários sobre os acidentes de Chernobyl, Goiânia e de Fukushima.

### Objetivos específicos:

Conhecer a história dos acidentes de Chernobyl, de Goiânia e de Fukushima.

Compreender os conceitos de Fissão e Fusão Nuclear.

Investigar os efeitos das radiações nos tecidos vivos.

### Procedimento:

Para o desenvolvimento desta atividade serão enviados aos alunos os links dos documentários, que estão armazenados no repositório digital do Youtube. Para acessar o documentário sobre Chernobyl, produzido pela Discovery Channel, basta clicar no link <https://youtu.be/bv4AocZsfHs> bem como nos documentários sobre Goiânia produzido pela Rede Globo <https://youtu.be/hP-8D-YglDo> e o de Fukushima produzido pela National Geographic disponível em <https://youtu.be/1hzLzELXXTI> .

Em sala de aula utilizar uma apresentação em Prezi, que está na web, localizada no link <https://prezi.com/yeelevggw7c8/fissao-fusao-nuclear/> para a discussão sobre os conceitos de Fissão e Fusão Nuclear.

### Avaliação:

A avaliação será verificada a partir da resolução e discussão das questões a seguir.

## Resolução dos Exercícios

Exercícios a serem considerados após a apresentação.

1) A energia lançada no espaço pelo Sol:

- a) provém das reações nucleares que ocorrem em seu interior por causa da alta pressão e da temperatura.
- b) ocorrem na superfície.
- c) ocorrem na fotosfera.
- d) ocorrem na cromosfera.
- e) não ocorrem no Sol.

2) Leia com atenção o texto abaixo e responda a questão proposta.

Quando o físico francês Antoine Henri Becquerel descobriu, em 1896, que o urânio emitia espontaneamente uma radiação que ele denominou “raios urânicos”, seguiu-se uma grande revolução no conhecimento científico. Sua descoberta contribuiu para a hipótese de que o átomo não era o constituinte último da matéria e abriu caminho para a área da física nuclear. O próprio Becquerel identificou que os “raios urânicos” eram constituídos de três partes distintas. Mais tarde, essas partes foram denominadas radiação alfa (núcleo do átomo de hélio), radiação beta (elétrons altamente energéticos) e radiação gama (de natureza eletromagnética). Marie Curie e seu marido Pierre Curie verificaram esse mesmo fenômeno em dois novos elementos, rádio e polônio, por eles descobertos.

Podemos afirmar que o texto:

- a) trata da descoberta da radioatividade.
- b) trata da descoberta do efeito fotoelétrico.
- c) mostra a origem da radiação eletromagnética.
- d) apresenta a origem do conceito de átomo.
- e) n.d.a

3) Assinale a alternativa que preenche corretamente a lacuna do parágrafo abaixo.

O Sol é a grande fonte de energia para toda a vida na Terra. Durante muito tempo, a origem da energia irradiada pelo Sol foi um mistério para a humanidade. Hoje, as modernas teorias de evolução das estrelas nos dizem que a energia irradiada pelo Sol provém de processos de \_\_\_\_\_ que ocorrem no seu interior, envolvendo núcleos de elementos leves.

- a) espalhamento
- b) fusão nuclear
- c) fissão nuclear
- d) fotossíntese
- e) combustão

## ATIVIDADE 6: AS REAÇÕES QUÍMICAS E A INTERAÇÃO COM AS RADIAÇÕES

Objetivo Geral:

Compreender os processos de rearranjo das nuvens eletrônicas.

Objetivos específicos:

Compreender o que são as ligações químicas e os processos reativos.

Identificar quais fatores interferem no rearranjo das nuvens eletrônicas nas eletrosferas das moléculas.

Explicar a dinâmica dos processos de rearranjo das nuvens eletrônicas utilizando o modelo acoplado por aspectos indutivos.

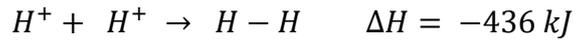
Procedimentos:

Fazer uma revisão a fim de conceituar o que são as ligações químicas, explicando que os átomos estão conectados por ligações, ou seja, elas são a “cola” que mantém os átomos juntos. Mas como essa cola funciona e o que ela de fato é? Para respondermos essa pergunta devemos concentrar atenção aos elétrons.

A existência dos elétrons foi proposta pela primeira vez em 1874 por George Simon Stone, que tentou explicar conceitos da eletroquímica indicando a presença de partículas com carga unitária, que inclusive cunhou o termo elétron para descrever a partícula.

J. J. Thomson, mostrou experimentalmente resultados que comprovaram a existência do misterioso elétron de Stone e é creditado a ele a descoberta do elétron. E em 1916, Gilbert Lewis definiu uma ligação covalente como o resultado de dois átomos compartilharem um par eletrônico.

Consideremos, por exemplo, uma ligação entre dois átomos de hidrogênio formando  $H_2$ :



Cada átomo de hidrogênio tem apenas um elétron e quando estes elétrons são compartilhados para formar uma ligação ocorre uma diminuição da energia representado pela variação negativa de  $\Delta H$ .

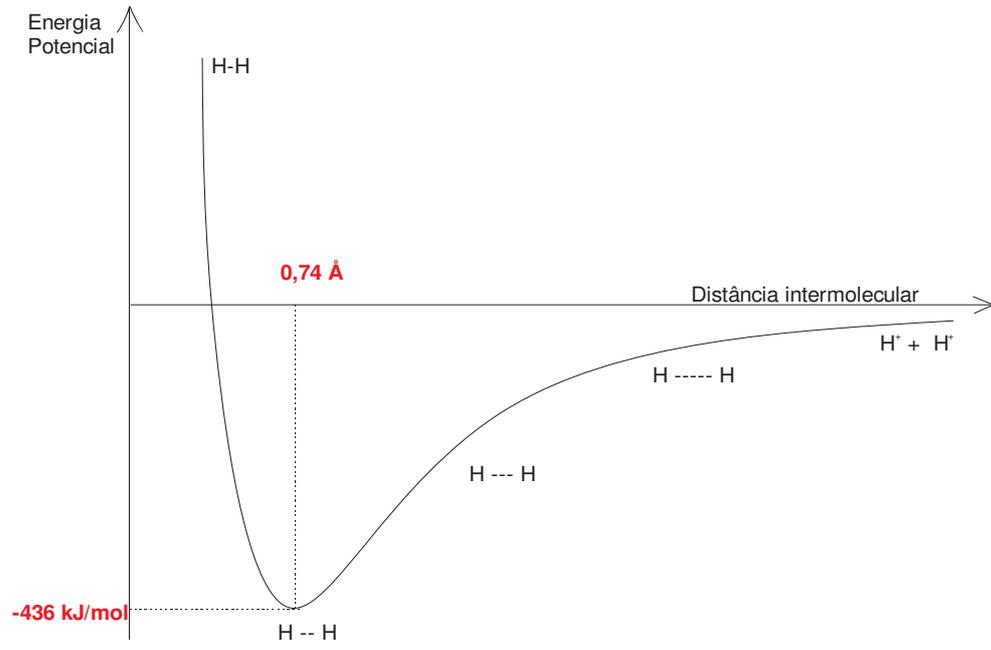
No diagrama da Figura 1, é mostrado a energia total dos átomos de hidrogênio em função da distância entre eles. Podemos observar à direita uma considerável distância entre eles e à medida que se move a esquerda no diagrama podemos ver que a distância vai diminuindo. Neste cenário, há várias forças que precisamos levar em conta:

- a) A força de repulsão entre os elétrons carregados negativamente;
- b) A força de repulsão entre os dois núcleos carregados positivamente;
- c) As forças de atração entre os núcleos carregados positivamente e os elétrons carregados negativamente.

A seguir podemos observar, de acordo com as figuras 1 e 2, que a medida que os átomos se aproximam, estas forças tornam-se cada vez mais fortes e, sob estas condições, os elétrons se movimentam de tal modo que as forças repulsivas são minimizadas e as forças atrativas sejam maximizadas, resultando uma força de atração que resulta na redução da energia do sistema.

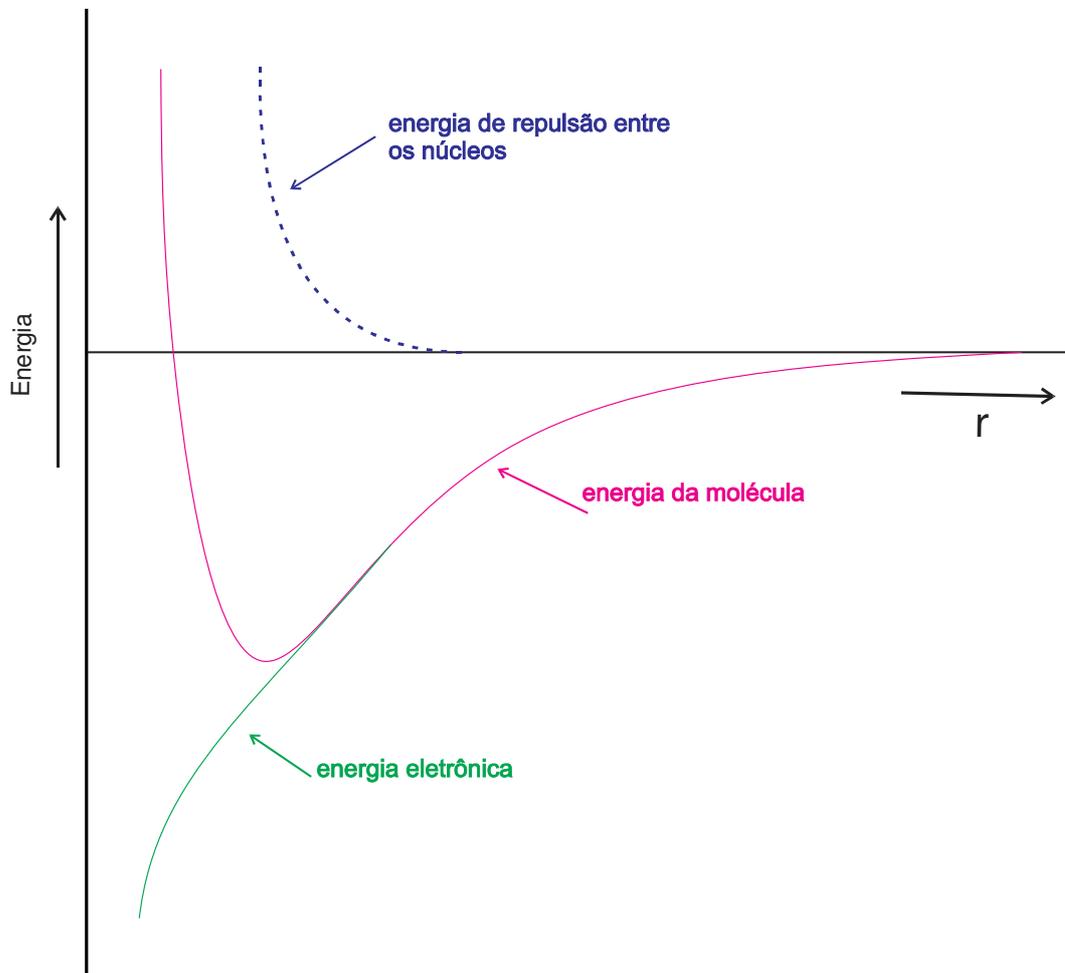
Quanto mais os átomos se aproximam a energia continua a ser reduzida até os núcleos alcancem uma distância de  $0,74 \text{ \AA}$  (angstrom). A partir deste ponto a força de repulsão começa a sobressair a força de atração, fazendo com que a energia do sistema aumente. O ponto mais baixo da curva representa o estado de menor energia (o estado mais estável).

Figura 1: Diagrama de Energia em função da Distância Intermolecular.



Fonte: do autor.

Figura 2: Variação da energia potencial de dois átomos de hidrogênio em função da separação intermolecular.



Fonte: do autor.

As ligações químicas podem ser classificadas em três classes: (1) covalente, (2) covalente polar e (3) iônica. De acordo com Klein (2016), essas variações surgem pelos diferentes valores de eletronegatividade dos átomos que compartilham uma ligação.

Podemos ver pela tabela 1 os valores de eletronegatividade para os elementos encontrados na química orgânica.

Quando dois átomos formam uma ligação, há uma consideração que deve ser observada para permitir classificar a ligação. Trata-se da diferença de eletronegatividade dos dois átomos:

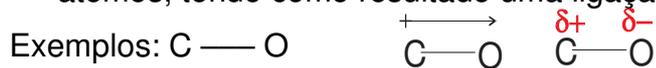
Tabela 1: Valores de eletronegatividade de alguns elementos comuns.

Aumento da eletronegatividade							Aumento da eletronegatividade
→							
			H				
			2,1				
Li	Be	B	C	N	O	F	
1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	
Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	
0,9	1,2	1,5	1,8	2,1	2,5	3,0	
K						Br	
0,8						2,8	

- a) **Se a diferença de eletronegatividade for menor do que 0,5**, considera-se que os elétrons sejam compartilhados igualmente entre os dois átomos, tendo como resultado uma ligação covalente.



- b) **Se a diferença de eletronegatividade estiver entre 0,5 e 1,7**, considera-se que os elétrons não sejam compartilhados igualmente entre os dois átomos, tendo como resultado uma ligação covalente polar.



- c) **Se a diferença de eletronegatividade for maior do que 1,7**, considera-se que os elétrons não sejam compartilhados. A diferença de eletronegatividade é tão grande que os elétrons da ligação são possuídos exclusivamente pelo mais eletronegativo.

Exemplo a ligação entre o o oxigênio e o sódio no hidróxido de sódio (NaOH).  $\text{Na}^{\oplus} \text{ :}\ddot{\text{O}}\text{H}$

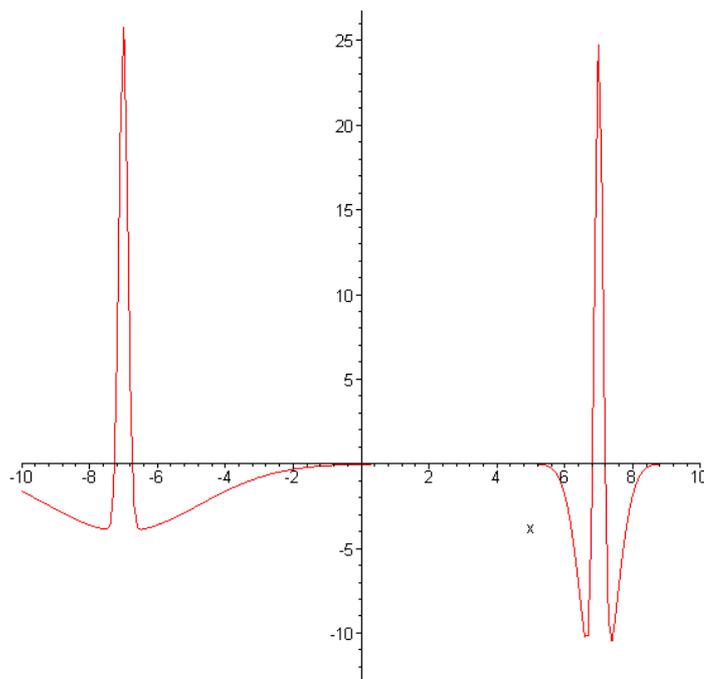
Podemos ver a seguir a dinâmica de um sistema diatômico partindo de um estado inicial sem interação nenhuma a um estado final, com os átomos formando um estado ligado.

Uma vez estabelecido o efeito individual de cada um dos termos basta então somar suas influências em locais específicos da curva, a fim de obter as variações temporais resultantes. Para átomos isolados, os efeitos se anulam

mutuamente, produzindo estruturas estáveis que caracterizam um regime estacionário.

Entretanto, quando o átomo é atingido por radiação de determinadas frequências ou mesmo pela presença de um segundo átomo em suas vizinhanças, esse equilíbrio é perturbado, produzindo um efeito transiente que define a dinâmica relativa aos processos de formação e ruptura de ligações. Assim, através da composição qualitativa dos efeitos produzidos pelos termos: a) massivo; b) quadrático e c) de curvatura, podem ser elucidados alguns aspectos importantes da dinâmica que governa o processo de rearranjo das nuvens, à medida que dois átomos se aproximam gradualmente. As figuras 3 a 6 mostram a evolução temporal de um sistema diatômico que forma um estado ligado, devido à compatibilidade geométrica de seus respectivos poços de potencial. Quando os átomos ainda estão suficientemente afastados (figuras 3 e 4), não existe qualquer curvatura na linha que liga ambos os átomos. Assim, não ocorrem modificações no formato do potencial, porque a amplitude local também é nula.

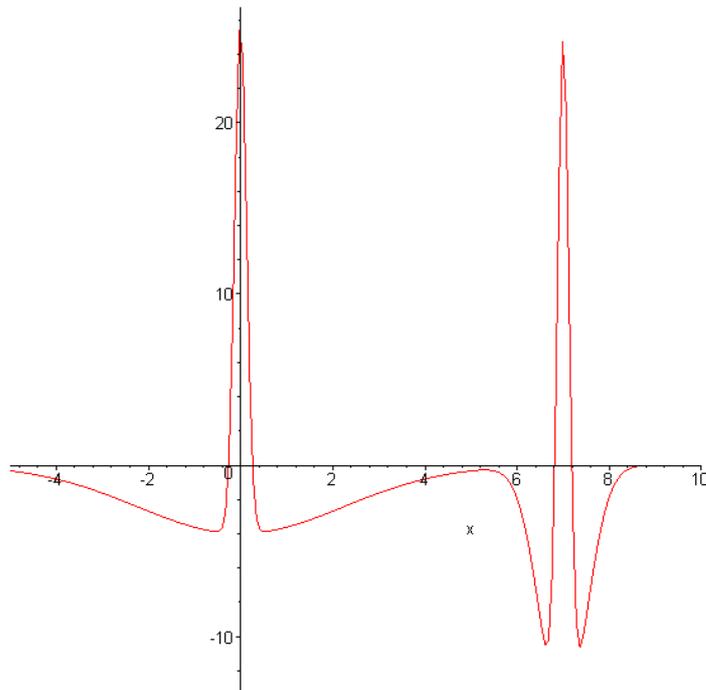
Figura 3: Átomos muito afastados (não há qualquer interação)



Na figura 4, os átomos estão suficientemente próximos para formar um ponto de máximo nas vizinhanças do átomo da direita. Neste ponto a concavidade é negativa

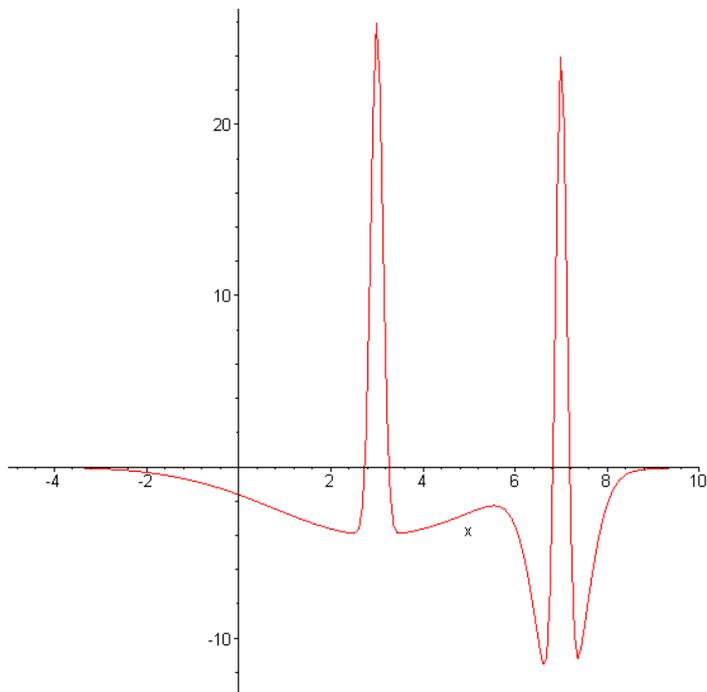
e, portanto. O potencial tende a decrescer, como mostram as figuras 5 e 6. O formato da função potencial tende então a estabilizar, uma vez que a concavidade é atenuada, embora seja auxiliada pelo termo quadrático, que também induz o potencial a diminuir. Entretanto, esses dois termos sofrem oposição da parcela massiva, que aumenta o valor local do potencial, e o sistema tende a estabilizar.

Figura 4: Átomos relativamente afastados (pequena interação)



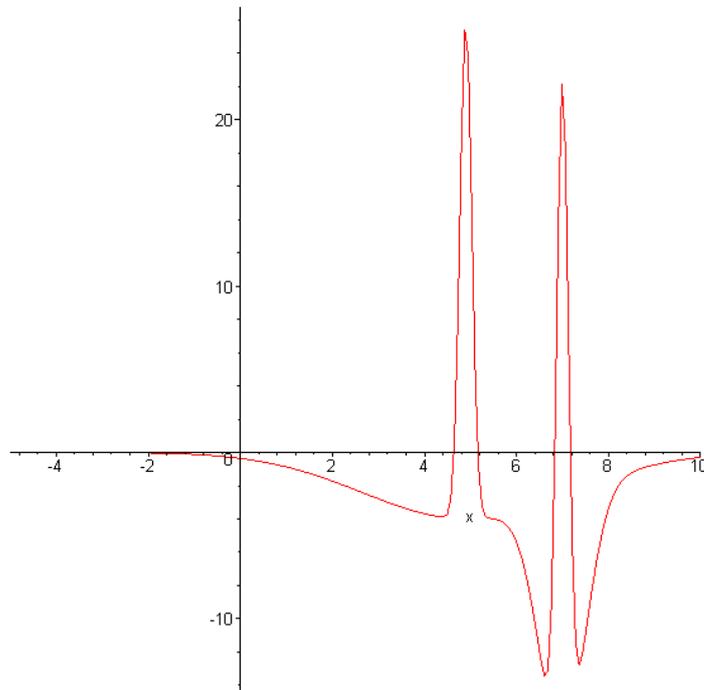
O processo assim descrito, mostra a formação de uma ligação iônica entre um metal e um halogênio, que correspondem, respectivamente, aos átomos da esquerda e da direita. Nesse cenário, o halogênio parece atrair a nuvem eletrônica do metal, a partir do momento em que o ponto de máximo local é produzido, como consequência da aproximação entre os átomos. De fato, o surgimento desse ponto crítico constitui uma condição necessária para a formação do estado ligado. Entretanto, essa condição pode eventualmente não ser satisfeita, como mostra a próxima sequência de figuras (7 e 8). Nesta sequência, dois átomos se aproximam, mas não formam um máximo local, o que não deflagra a formação de um estado ligado, devido ao pequeno alcance dos poços de potencial.

Figura 5: Início da formação do estado ligado



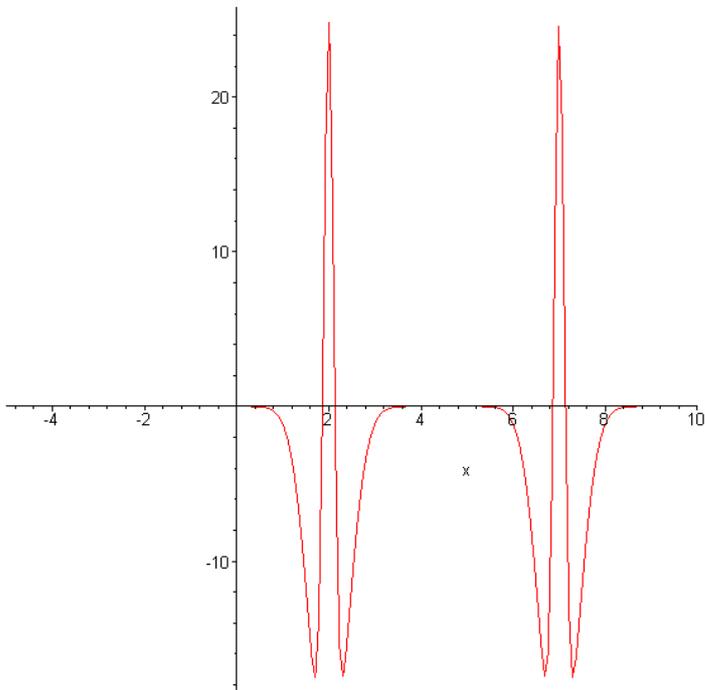
O processo descrito anteriormente mostra a tentativa malsucedida de obter um estado ligado entre dois átomos de Neônio, corroborando o fato de não haver ligações entre gases nobres. Contudo, convém lembrar que o modelo unidimensional apresenta apenas um termo relativo à curvatura, de modo que a influência anti-ligante da concavidade local positiva pode eventualmente resultar subestimada.

Figura 6: Formação de ligação iônica



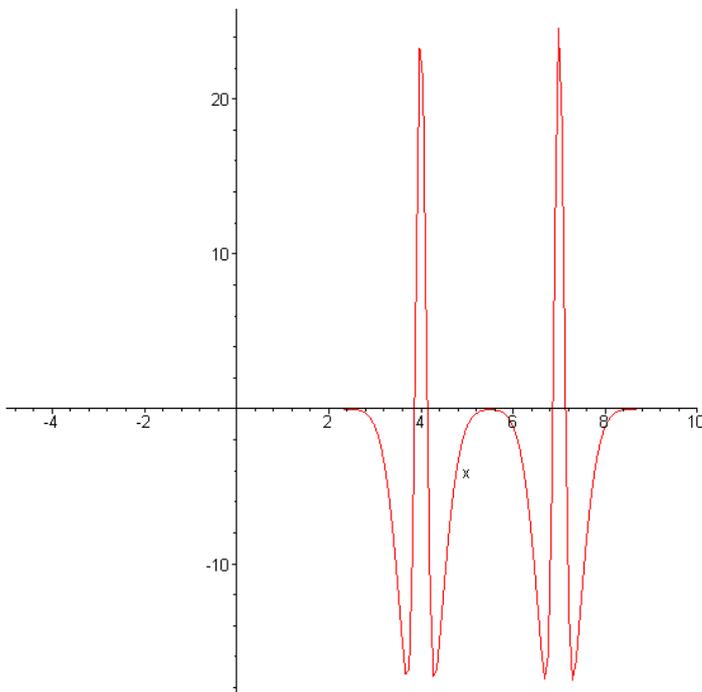
Em outras palavras, é preciso também considerar as influências das derivadas de segunda ordem em relação às variáveis  $y$  e  $z$ , para que o efeito da concavidade local seja estimado de forma correta. Além disso, é importante ter em mente que os valores locais dessas concavidades podem ter sinal oposto, de modo que o efeito da soma de todas as derivadas de segunda ordem não necessariamente resulta maior do que o valor da derivada segunda em relação à variável  $x$ . Assim, o efeito anti-ligante pode, em alguns casos, inclusive ser atenuado ao invés de amplificado. É necessário, portanto, observar mais atentamente o formato dos poços de potencial nos modelos multidimensionais, a fim de refinar a intuição geométrica.

Figura 7: Tentativa de ligar dois átomos de gases nobres



Na próxima seção, é apresentada a equação de Klein-Gordon bidimensional auto-consistente, que constitui um refinamento significativo com relação ao modelo unidimensional. Nessa nova equação, não apenas o efeito das concavidades locais se torna mais próximo da realidade, mas a influência da anisotropia dos orbitais passa também a ser considerado, fornecendo uma nova intuição geométrica sobre o processo de catálise.

Figura 8: Mesmo muito próximos, os átomos não formam estado ligado



Exercício:

- 1) Nas figuras 3 e 5 vemos uma diferença entre os potenciais de interação entre os dois átomos. O que você percebe com relação ao estado de ligação entre os dois átomos?
  
- 2) Se você promovesse uma reação entre dois compostos que resultariam em outros produtos, o  $\text{Na}_2\text{O}$  e o  $\text{Na}_2\text{S}$ . Qual o tipo de ligação que provavelmente ocorrerá entre os átomos? Explique sua linha de raciocínio.
  
- 3) Considere a estrutura do Metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ). Indique todas as ligações covalentes polares e mostre quaisquer cargas parciais que resultam de efeitos indutivos.

## ATIVIDADE 7: DENSIDADES ELETRÔNICAS

Objetivo Geral:

Compreender os processos de síntese a partir da localização dos locais de maior densidade eletrônica.

Objetivos específicos:

Analisar a estrutura das ligações do anel benzênico e levando em conta a estrutura ressonante que produzem as ligações entre os carbonos.

Compreender o que são as ligações químicas e os processos reativos.

Averiguar as relações para a sustentação da Regra de Markovnikov.

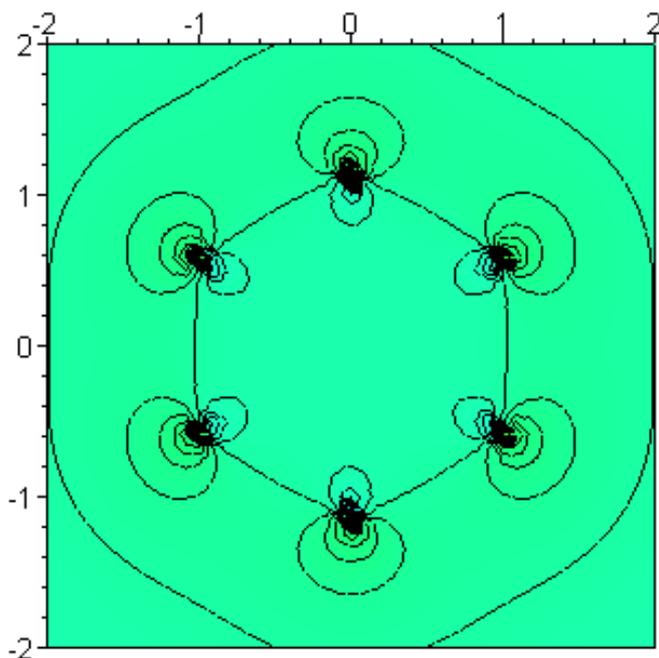
Procedimentos:

### 1. A MOLÉCULA DE BENZENO

Podemos ver na figura 1, a presença dos seis carbonos posicionados de modo a formar um hexágono equilátero, que somente estão posicionados sem formarem ligações entre si.

O modelo transiente é então aplicado sobre essa estrutura, tomada como estado inicial do sistema reativo, a fim de verificar se ocorre a formação de um estado ligado, que caracteriza o anel benzênico.

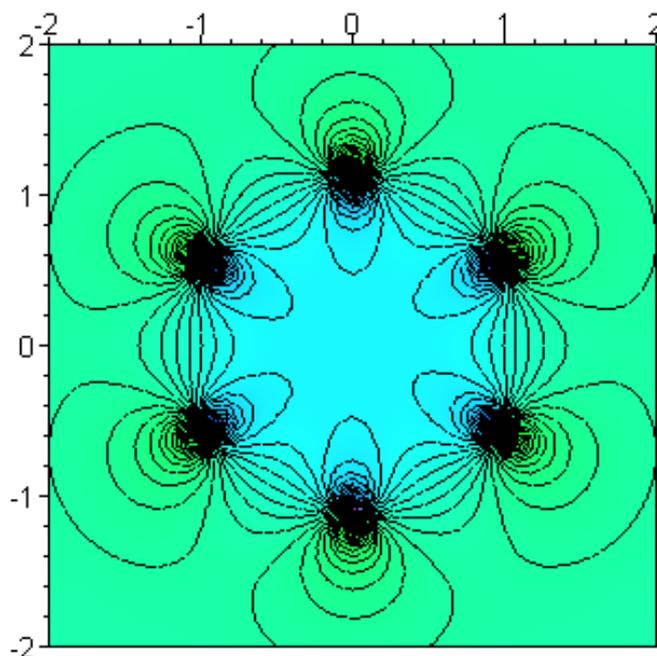
**Figura 1:** Carbonos posicionados formando um hexágono regular.



Fonte: do autor.

Na figura 2, podemos constatar que as ligações são formadas, e distribuídas com igual intensidade sobre toda a extensão do anel. O potencial de interação para o anel benzênico, cuja estabilidade deveria ser justificada pela influência conjunta dos respectivos valores locais de amplitude e concavidade, pode ser realmente verificada ao examinar outra vista do mesmo arranjo de átomos.

**Figura 2:** Rearranjo dos átomos de carbono na formação do anel de benzeno.



Fonte: do autor.

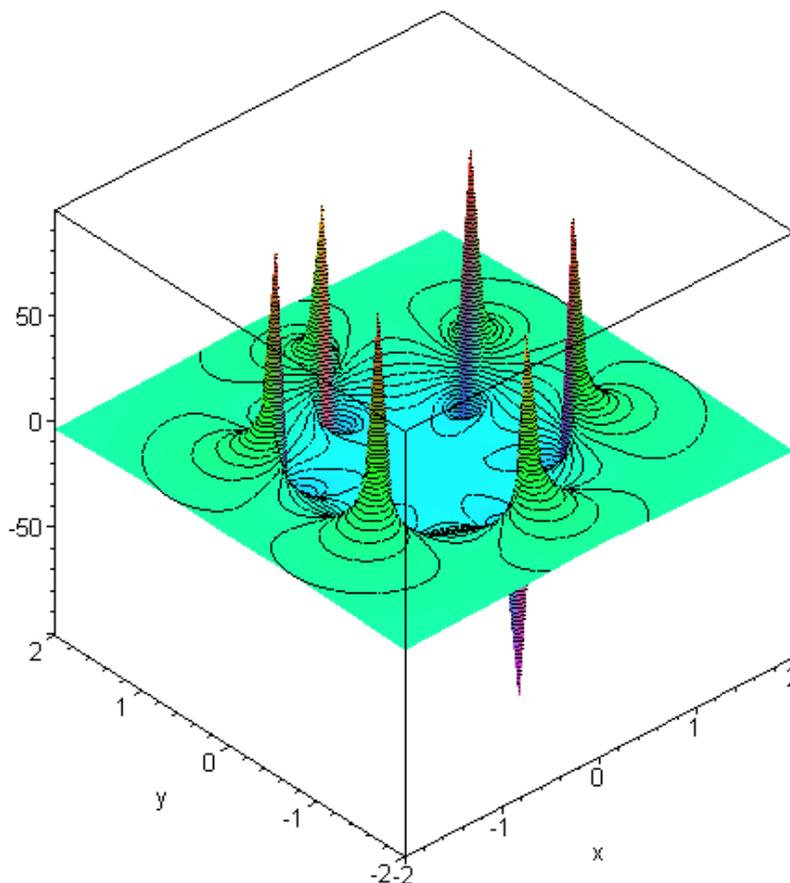
Na figura 3, temos uma representação tridimensional da molécula de benzeno, podem ser vistos o poço de potencial pouco profundo, mas de grande alcance, que liga de maneira aproximadamente uniforme todos os átomos de carbono presentes no anel.

Podemos notar que a concavidade desse poço é praticamente nula em quase toda a sua extensão, exceto nas vizinhanças dos caroços repulsivos, localizados junto aos núcleos. Assim, a influência do operador laplaciano<sup>3</sup> sobre o estado final da função potencial é praticamente desprezível no interior do anel. Nesse caso, a amplitude do poço de potencial em regime estacionário pode ser obtida ao igualar os termos massivo e quadrático, isto é,  $V^2 = -2m^2V$ . Condição que resulta em  $V = 0$  ou  $V = -2m^2$ .

<sup>3</sup> Operador Laplaciano é o operador matemático:  $\nabla^2 F = \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial z^2}$ .

Matematicamente, o Laplaciano pode ter como significado a verificação da concavidade de uma função. Por exemplo, se  $\nabla^2 F > 0$  a concavidade da função é para cima (indicando um ponto abaixo da média) e se  $\nabla^2 F < 0$  a concavidade é para baixo (indicando um ponto acima da média).

**Figura 3:** Estrutura tridimensional do anel de benzeno.



Fonte: do autor.

Esse argumento simples, embora quantitativo, explica a estabilidade do anel benzênico, sem que se faça necessário recorrer a teorias envolvendo estruturas canônicas de ressonância, inatingíveis para alunos do Ensino Médio. A geometria própria, particular do poço de potencial justifica plenamente a obtenção de um estado estacionário, o que confere estabilidade a essa estrutura plana.

Em particular, as concavidades locais nas direções x e y são praticamente opostas, o que constitui uma condição favorável à estabilização da estrutura molecular.

## 2. A REGRA DE MARKOVNIKOV

A regra de Markovnikov traz a informação de que em cadeias carbônicas insaturadas, o átomo de carbono mais hidrogenado constitui o candidato mais provável para receber um átomo de Hidrogênio adicional. Essa regra pode ser justificada pela conformação do poço de potencial do Hidrogênio e da própria ligação Carbono-Hidrogênio. Para tanto, é preciso ter em mente que, no processo de formação de uma ligação, o átomo cujo poço de potencial é mais profundo e de menor alcance atua como um ente que drena os elétrons. Retornando ao exemplo do que ocorre na ligação iônica entre Sódio e Cloro, o ponto de máximo local do potencial, formado junto ao átomo de Cloro, atenua ao longo do tempo. Desse modo, o Cloro tende a drenar o poço de potencial do átomo de Sódio, que é mais raso e cujo alcance é maior. Entretanto, na ligação  $C - H$  esse efeito não é tão pronunciado, pois os formatos dos respectivos poços de potencial não diferem tanto a ponto de formar uma ligação iônica. Neste caso, o caráter iônico da ligação é menos acentuado, o que é caracterizado pela formação de um máximo local não tão próximo do Carbono, que atua como acceptor, mas ligeiramente à direita do ponto médio entre os átomos. Ao atrair a nuvem eletrônica com menor intensidade do que o Cloro no exemplo unidimensional, o alcance do poço de potencial do Carbono se torna um pouco maior. Isto possibilita a ligação com um átomo de Hidrogênio adicional que se encontre inicialmente mais distante, aumentando a probabilidade de atrair e capturar esse átomo, ainda que este esteja um pouco mais próximo de outro Carbono menos hidrogenado.

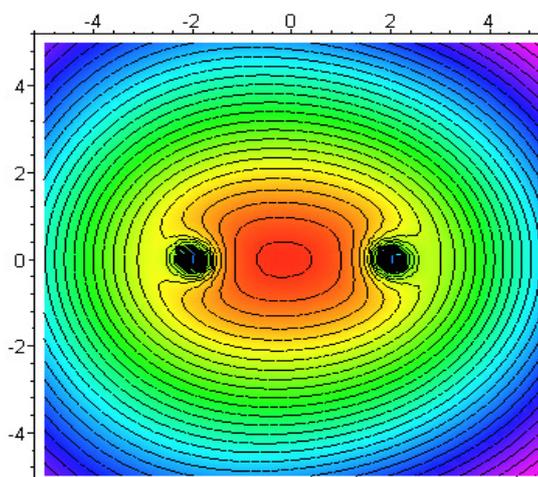
Nesta passagem pode ser verificada a fragilidade do argumento que induz a aceitar a regra de Markovnikoff. Nota-se que dependendo da distância que o átomo de Hidrogênio se encontra em relação ao Carbono já hidrogenado, bem como da presença de heteroátomos na cadeia, a concavidade local do poço resultante da ligação  $C - H$  pode inclusive desfavorecer a entrada de um novo átomo de Hidrogênio. Esse cenário desfavorável, que caracteriza um comportamento anti-Markovnikoff, ou Regra de Kharash, é plenamente justificado pelo modelo proposto, que considera não apenas o fato de um dos átomos de Carbono ser mais hidrogenado, mas também considera outros ligantes próximos do suposto sítio ativo para a adição do átomo de Hidrogênio.

### 3. Formação de carbocátions

A formação de íons a partir de ligações covalentes pode ser induzida pela aproximação de átomos adicionais, seguindo essencialmente a mesma dinâmica prevista pelo modelo matemático. Reinterpretando a sequência de mapas em termos das parcelas quadrática, massiva e de concavidade, verifica-se que a analogia permanece válida, ao, observar que essas figuras fornecem, de forma indireta, informações sobre amplitudes e concavidades.

A figura 04 mostra o estado inicial do sistema, exibindo uma nuvem eletrônica entre dois átomos de carbono adjacentes, que caracteriza uma ligação 100% covalente. Essa ligação sofrerá alterações em suas direções preferenciais devido à aproximação de átomos de Hidrogênio. Essas alterações na conformação da nuvem provocam mudanças contínuas de valência, produzindo ligações de ordem fracionária e emulando o processo de hibridização de orbitais, caracterizado pela alteração da sua anisotropia<sup>4</sup>.

Figura 04: Ligação covalente carbono-carbono.



Fonte: do autor.

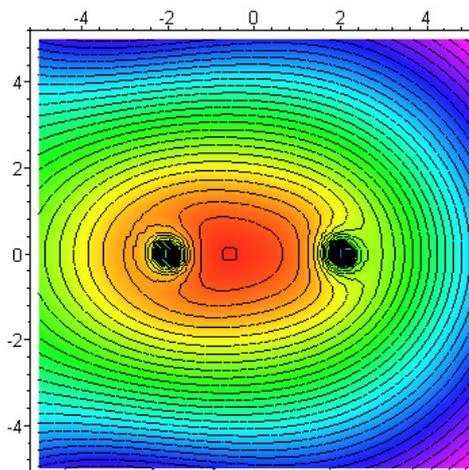
Ao receber radiação ocorre um deslocamento da densidade da nuvem eletrônica para do átomo de carbono da esquerda, como mostra a figura 03. Essa incidência é

---

<sup>4</sup> Anisotropia é a característica de um meio, ou de um material, em que certas propriedades físicas serão diferentes conforme as diferentes direções.

provocada pela aproximação de dois átomos de Hidrogênio, formando inicialmente uma ligação de Van der Waals.

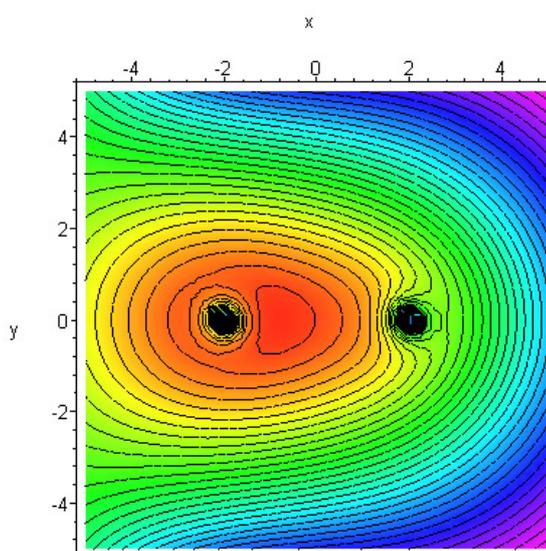
Figura 05: Formação de ligação VdW entre carbono e hidrogênio



Fonte: do autor.

Ao aproximar ainda mais os átomos de Hidrogênio do átomo de carbono à esquerda, como visto na figura 06, verifica-se um deslocamento ainda maior da densidade da nuvem eletrônica para as proximidades desse átomo. Essa conformação é típica de uma ligação iônica, na qual o átomo de Carbono à esquerda representa um ânion, e o da direita faz o papel de um cátion.

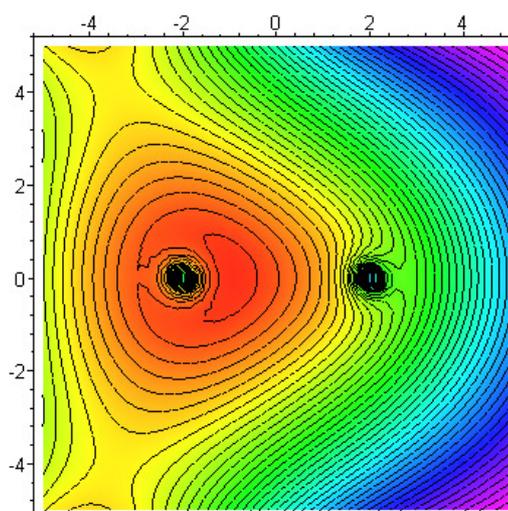
Figura 06: Aproximação dos átomos de carbono e hidrogênio



Fonte: do autor.

Finalmente, essa aproximação resulta claramente na produção de um carbocátion<sup>5</sup> formado à direita da ligação carbono-carbono, conforme mostrado na figura 07. Esta figura apresenta também o aumento da densidade eletrônica, em tons de vermelho, no átomo à esquerda, em função da aproximação de dois átomos de hidrogênio.

Figura 07: Visualização das novas ligas Carbono-Hidrogênio



Fonte: do autor.

Embora os efeitos de campo sejam claramente identificados na sequência apresentada, a dinâmica regida pela equação empregada ainda não foi realmente elucidada. A próxima seção apresenta uma análise sumária do processo que descreve a evolução temporal de uma função potencial cuja dinâmica obedece a equação de Klein-Gordon.

#### 4. A natureza dos processos reativos – uma abordagem qualitativa

<sup>5</sup> Em um carbocátion, o carbono deficiente em elétrons está ligado a outros átomos por meio de orbitais do tipo  $sp^2$ , sendo partículas extremamente reativas. Os carbocátions tem uma estrutura trigonal plana com o carbono hibridizado em  $sp^2$  tendo um orbital p vazio.

Uma vez que foram utilizados mapas do potencial de interação ao invés da função de onda para analisar o processo de rearranjo, as figuras anteriores mostram, na verdade, nuvens fotônicas e não eletrônicas. Isso ocorre porque qualquer potencial está diretamente relacionado aos bósons transferidos entre os respectivos férmions da interação correspondente. Dessa nova abordagem surge uma série de conclusões não triviais sobre a natureza dos processos químicos.

- i) Assim como as nuvens eletrônicas interferem entre si, também sofrem influência da radiação incidente, pois tanto as nuvens quanto a radiação são compostas basicamente de fótons.
- ii) Conseqüentemente, quando se considera que uma molécula é decomposta pela incidência de radiação, na verdade foram formados novos compostos oriundos da interação entre radiação e matéria. Assim, a radiação pode ser considerada como uma nuvem independente, na qual não figuram núcleos. Essa nuvem reage diretamente com a chamada eletrosfera das moléculas, produzindo novos compostos.
- iii) A segunda conclusão sugere que as leis básicas que regem a interação radiação-matéria e o rearranjo das nuvens eletrônicas durante um processo reativo sejam idênticas. Esse ponto de vista é também extensível aos processos de mudança de fase. Quando a radiação incide sobre um composto líquido, rompe ligações intermoleculares, liberando para a fase gasosa uma certa quantidade de moléculas. Essas moléculas liberadas, cujas nuvens não possuem a mesma conformação daquelas que se encontram em fase líquida, diferem também em suas propriedades fundamentais. Dessa forma, ocorreu efetivamente uma reação entre as moléculas e a radiação incidente, produzindo de fato uma nova classe de compostos químicos.
- iv) Da conclusão iii decorre naturalmente uma concepção mais profunda, embora acessível, dos chamados níveis de energia permitidos para átomos e moléculas. Uma determinada molécula em diferentes níveis de energia, constitui, em última análise, a uma série de compostos cujos comportamentos químicos diferem consideravelmente.
- v) Essa idéia é corroborada pela ocorrência do efeito Zeeman, onde o espectro de emissão de uma molécula exposta a campos magnéticos tênues sofre alterações significativas. Essas alterações consistem basicamente no desdobramento de níveis de energia em um espectro hiperfino. Uma vez que a presença de um campo magnético tenue, que consiste meramente em um campo fônico fraco, é capaz de alterar o espectro de energia de uma molécula e, portanto, a própria conformação da nuvem correspondente, parece razoável que a presença de outra molécula em suas proximidades deva causar efeitos análogos. De fato, no âmbito da

Química Organica, os chamados efeitos indutivos são amplamente reconhecidos como responsáveis por alterações no comportamento dinâmico das moléculas.

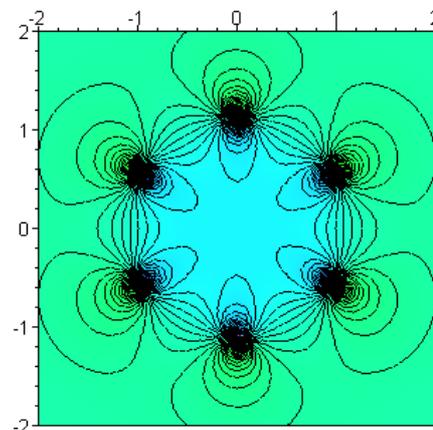
- vi) Essa concepção altera radicalmente a noção de catálise, justificando plenamente o fato de que os catalisadores reduzem a energia de ativação necessária para deflagrar um processo reativo. Os catalisadores se combinam temporariamente com um ou mais reatantes, formando compostos intermediários que reagem facilmente entre si, e assim geram os produtos de reação. Ocorre que a energia de ativação é medida essencialmente na banda térmica (faixa do infravermelho) e que a banda de catálise característica da grande maioria das reações inicia na faixa do ultravioleta. Assim,, é natural admitir que uma reação que não ocorra em autoclave possa ser facilmente deflagrada quando os reatantes são expostos a radiação ultravioleta de baixa potência. As radiações de maior frequência são justamente as responsáveis pela deformação dos poços de potencial dos átomos envolvidos no processo reativo.
- vii) Isto ocorre porque não são apenas os metais que sofrem o chamado efeito fotoelétrico quando expostos a feixes de radiação de altas frequências. Esse efeito também se manifesta em sais e até mesmo em compostos orgânicos. Esta é a razão pela qual podem ser construídas baterias. Baterias nada mais são do que dispositivos nos quais a mudança das conformações das nuvens eletrônicas ao longo de uma reação química se manifestam com o surgimento de correntes. Essa conclusão é consistente com o comportamento dos cristais piezoelétricos, que produzem sinais elétricos quando as nuvens de seus átomos são subitamente comprimidas através de impacto mecânico. A diferença básica entre cristais piezoelétricos e outros materiais reside apenas na banda de frequência emitida ao receber o choque mecânico. Enquanto nos compostos piezoelétricos essa banda é próxima do ultravioleta, provocando centelhas, nos demais materiais o choque produz apenas calor, isto é, emissões na faixa do infravermelho.
- viii) Como consequência direta, surge também uma nova concepção para as chamadas radiações ionizantes. Para tanto, basta lembrar que embora os raios gama pertençam a essa classe de radiações, esses feixes, compostos por fótons, não possuem carga elétrica. Essa consideração remete novamente ao item vii, relativo ao efeito fotoelétrico.

A elucidação dos fenômenos descritos só foi realizada em tempo hábil para a elaboração do produto educacional, devido a uma característica peculiar do sistema de simulação implementado. Ao contrário dos demais sistemas de simulação, que utilizam apenas modelos quânticos para produzir informações relativas a propriedades

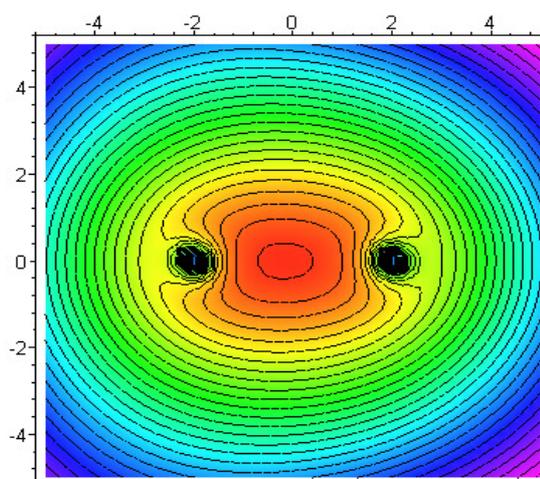
moleculares, o programa utiliza também a lei de Gauss do eletromagnetismo. Essa característica permite obter potenciais de campo autoconsistentes sem recorrer a métodos iterativos, tais como as formulações baseadas nas diversas variações do método de Hartree. Dessa nova formulação surgem códigos fonte de alto desempenho, cujo tempo de processamento requerido é da ordem de poucos segundos por átomo presente no sistema reativo. A rapidez com a qual são simulados diversos cenários permite ao usuário interpretar e generalizar os resultados obtidos, produzindo conclusões em tempo viável para a preparação de aulas, bem como para a geração de material didático e artigos científicos.

### Atividades

- 1) Com relação à figura 2, abaixo novamente apresentada, é possível estabelecermos alguma relação entre a imagem e a ressonância das ligas duplas dos carbonos?



- 2) Na figura 1, abaixo novamente apresentada, o que aconteceria com a nuvem eletrônica se aproximássemos:
- Um átomo de flúor, formando um haleto, à direita do par de carbonos? Formaríamos um carbocátion ou um carbânion?
  - Um átomo de sódio, à direita do par de carbonos? Formaríamos um carbocátion ou um carbânion?



## **ATIVIDADE 8: AVALIAÇÃO**

Objetivo Geral:

Averiguar e mensurar a aprendizagem sobre os conceitos envolvendo as reações químicas e a sua relação com as radiações.

Objetivos específicos:

Averiguar a aprendizagem dos alunos com relação ao que foi desenvolvido nesta sequência didática através da aplicação do questionário que utilizado no início deste planejamento.

Procedimentos:

Reaplicar o questionário introdutório.

Escola Estadual de Educação Básica Comendador Albino Souza Cruz

Nome: \_\_\_\_\_

Idade: \_\_\_\_\_ Sexo: \_\_\_\_\_

Turma: \_\_\_\_\_

1. Muito se ouve falar em radiação, nos jornais, revistas, televisão, internet, etc. Você sabe o que é radiação?  
 Sim.             Não.  
 Pode dar alguns exemplos? \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_
  
2. Quais são os tipos de radiação que você conhece?  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_
  
3. A radiação emitida por determinadas amostras de substâncias provém:
  - a) da energia térmica liberada em sua combustão.
  - b) de alterações em núcleos de átomos que as formam.
  - c) de rupturas de ligações químicas entre os átomos que as formam.
  - d) do escape de elétrons das eletrosferas de átomos que as formam.
  - e) da reorganização de átomos que ocorre em sua decomposição.
  
4. Dos exames por imagem a seguir, qual(is) utiliza(m) a radiação como princípio de funcionamento?  
 Ultrassonografia.             Tomografia.             Raios X.  
 Ressonância Magnética.             Densitometria Óssea.  
 Cintilografia por TEP –Tomógrafo por Emissão de Pósitrons.
  
5. Você é capaz de explicar a diferença entre raios X, ressonância magnética e cintilografia? Caso afirmativo, explique a(s) diferença(s). \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_
  
6. Você é capaz de diferenciar a radiação ionizante da não ionizante?

- 
- 
7. Geralmente escutamos que a radiação é nociva, ou seja, traz prejuízo à saúde dos seres vivos (ser humano, animais, plantas). Todo tipo de radiação pode ser enquadrado como nociva? Explique seu ponto de vista.

- 
- 
8. Você já ouviu falar dos benefícios do uso das radiações? Caso afirmativo, cite-os. \_\_\_\_\_

- 
- 
9. Em setembro de 1987, ocorreu o maior acidente radioativo no Brasil, na cidade de Goiânia, GO. Dois catadores de materiais recicláveis encontraram em um ferro-velho um equipamento de radioterapia, que usava césio 137, e ao perceber que o conteúdo de uma cápsula brilhava no escuro, levou consigo para mostrar aos seus familiares e conhecidos, guardando o conteúdo no bolso de sua camisa. Com isso, contaminou-se e a todos à sua volta. Como resultado, tiveram, oficialmente, 4 mortes e outras 249 pessoas que ficaram expostas a radiação tiveram algum tipo de contaminação. Com o acidente produziram-se 13.400 toneladas de lixo radioativo, que foram armazenados em um depósito que formou uma montanha artificial revestida de chumbo e concreto. Estima-se que esse lixo ofereça risco por aproximadamente 180 anos.

*Fonte: G1 Goiás. Césio 30 anos. 1/09/2017.*

Você sabe o significado da expressão “meia-vida” radioativa? Caso afirmativo, explique o que significa. \_\_\_\_\_

- 
- 
10. Assinale as opções onde os aparelhos utilizam radiação:

( ) Forno de micro-ondas      ( ) Telefone celular      ( ) Raios X  
 ( ) Telefone sem fio      ( ) Computador      ( ) Radio      ( ) Televisor

11. É de seu interesse aprender sobre o funcionamento dos aparelhos citados nos exercícios 4 e 10? Justifique: \_\_\_\_\_

- 
- 
12. Comumente nos deparamos com símbolos que nos informam sobre os mais diversos assuntos, desde o trânsito aos perigos de exposição a produtos que oferecem perigo a nossa saúde. Relacione os símbolos a seguir com seus respectivos significados.

	(a)	Risco biológico  ( )
	(b)	Risco tóxico  ( )
	(c)	Material corrosivo  ( )
	(d)	Material inflamável  ( )
	(e)	Material radioativo  ( )
	(f)	Alimento irradiado  ( )
	(g)	Irritante  ( )
	(h)	Material oxidante  ( )
	(i)	Radiação Não Ionizante  ( )

 (j)	Risco de Explosão  ( )
---	------------------------------

13. Dos símbolos acima, quais são pertinentes à radiação?

---

---

Extra:

14. Escreva sobre os conceitos apresentados nas duas últimas aulas, sobre os conceitos apresentados com relação as ligações químicas e as imagens que foram trazidas de aporte ao material.

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

15. Para você, esses conceitos foram de mais fácil entendimento em função da presença das figuras aliadas a explicação.

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## **SOBRE O PRODUTO EDUCACIONAL**

A ideia que norteia a construção do produto educacional consiste na aplicação dos mecanismos de aprendizado concebidos por David Paul Ausubel, produzindo uma estrutura que relaciona os novos conteúdos com os conhecimentos prévios que o aluno traz consigo. Essa ancoragem de conhecimentos baseia-se no uso das analogia de conceitos relacionados ao Eletromagnetismo e dos conhecimentos da Mecânica Quântica, inter-relacionados com através da Química.

O produto educacional concebido não envolve a rigidez relacionada a formalidade matemática, uma vez que ele é extremamente visual, ou seja, usa como técnica de aprendizagem o emprego de imagens geradas através de um sistema de simulações desenvolvido no software Maple<sup>6</sup>.

No aspecto relacionado ao tempo de processamento, o uso deste método computacional, empregando conhecimentos acima citados, reduz drasticamente o tempo de processamento das informações pertinentes aos átomos envolvidos na reação, para a ordem de 5 minutos por átomo presente na reação.

Os aspectos citados, não exigência do formalismo matemático e a redução do tempo de processamento são de suma importância para introduzir no Ensino Médio um tema de relevância como a Mecânica Quântica. São abordados assuntos como poço de potencial, efeito indutivo, formação de carbocátions, etc. de uma forma acessível aos alunos.

Este produto educacional foi construído como uma sequência didática potencialmente significativa, dentro de uma abordagem voltada as CTSA (Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente) para que o professor que for fazer uso deste planejamento, o possibilite aprofundar seu conhecimento sobre o assunto e que o aprimoramento seja um processo permanente e continuado.

Quando falamos em processo de ensino que envolva uma aprendizagem significativa temos que ter em mente que a predisposição em aprender do aluno é um

---

<sup>6</sup> Maple é um sistema algébrico computacional empregado na computação de expressões algébricas e simbólicas para construção de gráficos dinâmicos em duas ou três dimensões.

fator essencial, pois quando o aluno se esforça para que ele próprio identifica os conceitos pertinentes que servem na ancoragem dos novos conceitos, o processo torna-se, assim, mais fácil. Quando as interrelações não são acontecem e os conceitos não tem sua ressignificação, ocorre o que Ausubel chama de “aprendizagem mecânica”, nada mais acontecendo além de uma memorização sem significado. (MOREIRA; MASSONI,2015).

A aprendizagem significativa de Ausubel, pode ser diferenciada de três formas:

- a) Subordinada: a maior incidência de aprendizagem significativa é do tipo subordinada, ou seja, a nova ideia aprendida se encontra hierarquicamente subordinada a ideia preexistente. Há uma simples ancoragem de um conhecimento novo a um subsunsores relevante na estrutura cognitiva de forma que ambos os conhecimentos se modifiquem e sejam fortalecidos e enriquecidos, podemos caracterizar essa forma como sendo a mais comum.
- b) Superordenada: Nesta forma de aprendizagem significativa o novo conceito é mais geral e inclusivo que os conceitos subsunsores. Ocorre quando um conceito ou proposição mais geral do que algumas ideias já estabelecidas na estrutura cognitiva do estudante, é adquirido e passa a ser assimilado.
- c) Combinatória: Na combinatória ocorre o contrário da superordenada, pois um conceito pode integrar-se a todo um corpo de conhecimentos, isto é, para que ela ocorra na prática devemos compreender que alguns conceitos apenas são aprendidos se tivermos toda uma bagagem de outros conhecimentos para que ele faça sentido.

### **Descrição do Produto**

Ao serem apresentados os conteúdos relacionados a radiação, verificou-se que os alunos demonstraram grande interesse sobre o assunto proposto. Os alunos foram se apropriando das definições relacionadas ao estudo das radiações, aos processos reativos e a influência de um sobre o outro. O interesse e a apropriação dos conceitos foi sendo averiguada ao longo da aplicação desta sequência didática,

uma vez que se fez um trabalho interdisciplinar, relacionando os conteúdos da física – mecânica quântica e eletromagnetismo – com os conteúdos da química – ligações químicas e química orgânica – que neste caso os subsunçores que serviram de base para a ancoragem dos novos conceitos foram os aspectos relacionados às ligações químicas química orgânica.

Durante a aplicação deste produto educacional pôde ser notado que o uso de imagens foi um fator de deveras importância para a assimilação dos conteúdos e respectivamente aos conceitos pertinentes.

A aplicação deste produto educacional aconteceu na Escola Estadual de Educação Básica Comendador Albino Souza Cruz, na cidade de Rolante, estado do Rio Grande do Sul, com a turma 311 – 3º ano do Ensino Médio, do turno matutino – entre os meses de setembro e outubro de 2018, com um total de 16 horas aula, 8 semanas.

A avaliação do produto educacional será mensurada através da aplicação de um questionário a ser aplicada no final das aulas programadas, além do acompanhamento dos alunos na resolução e correção dos exercícios presentes no final de cada planejamento das aulas.

Salienta-se que a interrelação promovida pelas figuras utilizadas juntando a linguagem matemática e a intuição geométrica na produção das ligações entre os átomos provoca uma aprendizagem mais consistente. A percepção dos alunos vai crescendo a medida que o produto educacional vem sendo utilizado.

## **5.2 Roteiro de Aplicação**

O produto educacional está estruturado em um total de 16 horas/aula, desenvolvidas ao longo de oito semanas, tendo sua aplicação em uma turma de terceiro ano do Ensino Médio, no turno matutino.

**Atividade 1 – Aula 1 e 2:** Aplicação de Questionário Investigatório.

Duração: 1h 40 min (2 horas/aula)

Objetivo Geral:

- Verificar os conhecimentos prévios (subsunçores) que os alunos possuem em relação aos conceitos de radiação ionizante e radiação não ionizante para que sejam organizadas as aulas.

Objetivos específicos:

- Conhecer as concepções prévias dos alunos sobre as radiações.
- Apresentar de um modo contextualizado por meio de questões, objetivas e discursivas, os fenômenos da radiação.

Procedimento:

Para a realização da atividade será entregue um questionário contendo 13 questões envolvendo radiação. As respostas serão individuais para que o professor possa conhecer e mensurar os conhecimentos pré-existentes de cada aluno.

### **Atividade 2 – Aulas 3 e 4: O que os textos querem realmente dizer?**

Duração: 1h 40min (2 horas/aula)

Objetivo Geral:

- Averiguar a capacidade de abstrair as informações e interpretá-las a partir de um texto sobre radiações.

Objetivos Específicos:

- Conhecer a capacidade dos alunos em abstrair dos textos, tanto didáticos como os informativos, informações sobre radiação.
- Criar uma noção clara de que a radiação pode trazer riscos como também benefícios e que estes fazem parte do desenvolvimento da cidadania.

Procedimentos:

A partir dos textos selecionados sobre radiações fazer a leitura e em seguida a interpretação para abstração dos conhecimentos por trás das informações expostas. Propor aos alunos que façam um texto com base nos relatos dos grupos.

### **Atividade 3 – Aulas 5 e 6: O Espectro Eletromagnético**

Duração: 1h 40min (2 horas/aula)

Objetivo Geral:

- Conhecer o espectro eletromagnético e as relações entre frequência e comprimento de onda.

Objetivos Específicos:

- Construir o conceito de onda e a diferença entre onda mecânica e onda eletromagnética.
- Compreender as relações entre frequência, comprimento de onda e energia.
- Identificar as radiações ionizantes e as não ionizantes.
- Averiguar os usos pacíficos para as radiações.
- Realizar exercícios utilizando conhecimentos vistos aplicando equações matemáticas.

Procedimentos:

Para o desenvolvimento desta atividade será utilizado material audiovisual consistindo em uma apresentação em Prezi, elaborada pelo autor, com apoio de vídeo retirado do Youtube). Disponível em

[http://prezi.com/obmajlldqobu/?utm\\_campaign=share&utm\\_medium=copy&rc=ex0share](http://prezi.com/obmajlldqobu/?utm_campaign=share&utm_medium=copy&rc=ex0share)

Após serão feitas as atividades do livro didático baseadas na execução e resolução dos exercícios propostos.

#### **Atividade 4 – Aulas 7 e 8: A Física Médica**

Duração: 1h 40min (2 horas/aula)

Objetivo Geral:

- Conhecer as aplicações práticas da física relacionadas à saúde, na área que é incumbida à Física Médica.

Objetivos Específicos:

- Compreender os efeitos biológicos das radiações, sob o aspecto da física médica.
- Investigar os usos das radiações na medicina.
- Compreender que a radiação pode ser tanto nociva como benéfica.

Procedimentos:

Para a realização da atividade, foi combinado com a Professora. Dra. Ana Paula Mallmann, Coordenadora do Curso de Física Médica da Universidade do Vale

do Rio dos Sinos, para que ela fizesse uma palestra sobre Física Médica, abordando os conceitos de radiação ionizante e não-ionizante, natural e artificial. Efeitos da radiação no organismo. Ramos da física médica, radiodiagnóstico, radioterapia, segurança, etc.

### **Atividade 5 – Aulas 9 e 10: Acidentes Nucleares**

Duração: 1h 40min (2 horas/aula)

Objetivo Geral:

- Conhecer os conceitos relacionados à fissão e fusão nuclear a partir dos documentários sobre os acidentes de Chernobyl, Goiânia e de Fukushima.

Objetivos Específicos:

- Conhecer a história dos acidentes de Chernobyl, de Goiânia e de Fukushima.
- Compreender os conceitos de Fissão e Fusão Nuclear.
- Investigar os efeitos das radiações nos tecidos vivos.

Procedimentos:

Para o desenvolvimento desta atividade será enviado aos alunos os links dos documentários, que estão armazenados no repositório digital Youtube. Para acessar o documentário sobre Chernobyl, produzido pela Discovery Channel, basta clicar no link <https://youtu.be/bv4AogZsfHs> bem como nos documentários sobre Goiânia produzido pela Rede Globo <https://youtu.be/hP-8D-YglDo> e o de Fukushima produzido pela National Geographic disponível em <https://youtu.be/1hzLzELXXTI> .

Em sala de aula utilizar uma apresentação em Prezi, que está na web, localizada no link <https://prezi.com/yeelevggw7c8/fissao-fusao-nuclear/> para a discussão sobre os conceitos de Fissão e Fusão Nuclear.

### **Atividade 6 – Aulas 11 e 12: As reações químicas e a interação com as radiações.**

Duração: 1h 40min (2 horas/aula)

Objetivo Geral:

- Compreender os processos de rearranjo das nuvens eletrônicas.

Objetivos Específicos:

- Compreender o que são as ligações químicas e os processos reativos.
- Identificar quais fatores interferem no rearranjo das nuvens eletrônicas nas eletrosferas das moléculas.
- Explicar a dinâmica dos processos de rearranjo das nuvens eletrônicas utilizando o modelo acoplado por aspectos indutivos.

Procedimentos:

Para a execução desta aula, é feita a utilização das figuras produzidas a partir do software Maple, cujo código fonte está presente nos anexos, e das atividades constantes no planejamento.

### **Atividade 7 – Aulas 13 e 14: As Densidades Eletrônicas**

Duração: 1h 40min (2 horas/aula)

Objetivo Geral:

- Compreender os processos de síntese a partir da localização dos locais de maior densidade eletrônica.

Objetivos específicos:

- Analisar a estrutura das ligações do anel benzênico e levando em conta a estrutura ressonante que produzem as ligações entre os carbonos.
- Compreender o que são as ligações químicas e os processos reativos.
- Averiguar as relações para a sustentação da Regra de Markovnikov.

Procedimentos:

Para a execução desta aula, é feita a utilização das figuras produzidas a partir do software Maple, cujo código fonte está presente nos anexos, e das atividades constantes no planejamento.

### **Atividade 8 – Aula 15 e 16: Avaliação.**

Duração: 1h 40min (2 hora/aula)

Objetivo Geral:

- Averiguar e mensurar a aprendizagem sobre os conceitos envolvendo as reações químicas e a sua relação com as radiações.

Objetivos Específicos:

- Averiguar a aprendizagem dos alunos com relação ao que foi desenvolvido nesta sequência didática através da aplicação do questionário que utilizado no início deste planejamento.

Procedimentos:

Reaplicar o questionário introdutório. A análise se dará por comparação e buscará verificar se houve alteração nas respostas de maneira a verificar se houve uma aprendizagem significativa após a aplicação do produto.

## REFERÊNCIAS

ALVES, Liria. **Acidente com céσιο-137.** 2017. Disponível em <<https://brasilecola.uol.com.br/quimica/acidente-cesio137.htm>> acesso em 27 de maio de 2018.

DENARDINI, Clezio Marcos; COSTA, Joaquim Eduardo Rezende; LAGO, Alisson Dal. **As tempestades magnéticas do dia 15 de março de 2013 e a provável ocorrência de uma supertempestade magnética.** 2013. Disponível em: <[http://www.inpe.br/noticias/arquivos/pdf/Denardini et al. \(2013\) As%20tempestades magneticas%20do%20dia%2015 de marco de 2013 e a provavel ocorrencia de uma super-tempestade magnetica.pdf](http://www.inpe.br/noticias/arquivos/pdf/Denardini_et_al._(2013)_As%20tempestades_magneticas%20do%20dia%2015_de_marco_de_2013_e_a_provavel_ocorrencia_de_uma_super-tempestade_magnetica.pdf)>. Acesso em Mai. de 2018 .

**Descoberta das ondas de rádio – Hertz e Maxwell** disponível em <https://youtu.be/FYArBYI9V6o> acesso em 14.06 2018.

FLECK, Jeferson Albino. **Ondas eletromagnéticas.** 2018. Disponível em: <[https://prezi.com/obmajlldqobu/ondas-eletromagneticas/?utm\\_campaign=share&utm\\_medium=copy](https://prezi.com/obmajlldqobu/ondas-eletromagneticas/?utm_campaign=share&utm_medium=copy)> Acesso Jun. de 2018.

GUIMARÃES, Osvaldo. PIQUEIRA, José Roberto. CARRON, Wilson. **Física: Eletromagnetismo e Física Moderna.** 2018. São Paulo: Ática. V.3. 2. ed.

LE MOS, Giodines. **Fusão e fissão nuclear.** 2014. Disponível em: <<https://prezi.com/yeelevggw7c8/fissao-fusao-nuclear/>>. Acesso em: Mai. de 2018.

Nascimento , Elisângela; Murillo Velasco. **Césio 30 anos: Série do G1 Goiás reconta o maior acidente radiológico do mundo.** 2017. Disponível em: <https://g1.globo.com/goias/noticia/cesio-30-anos-serie-do-g1-goias-reconta-o-maior-acidente-radiologico-do-mundo.ghtml>>. Acesso em Mai. de 2018.

Revista Hypheness. **Há um corpo mumificado de um monge dentro desta estátua de mil anos.** 2015. Disponível em <<http://www.hypheness.com.br/2015/03/ha-o-corpo-mumificado-de-um-monge-dentro-desta-estatuade-mil-anos/>>. Acesso em 26 de maio de 2018.



## APÊNDICE B - RADIAÇÕES IONIZANTES E NÃO-IONIZANTES

A radiação eletromagnética é originada num campo elétrico vibratório movimentando-se no espaço associado a um campo magnético também vibratório que tem características referentes ao movimento ondulatório, viajando a velocidade da luz.

A radiação ionizante é qualquer tipo de radiação que retira elétrons dos átomos, produzindo assim íons. São radiações ionizantes as partículas alfa ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ), a radiação gama ( $\gamma$ ) e os raios X. Nêutrons e emissões alfa e beta são radiações corpusculares, enquanto que os raios X e a radiação gama são emissões eletromagnéticas.

As radiações não-ionizantes não provocam a retirada de elétrons dos átomos expostos. São as radiações das emissões eletromagnéticas das ondas de rádio, micro-ondas (MW) e infravermelho (IR).

### 2.1 Tipos de Radiações Ionizantes

Os tipos de radiações ionizantes existentes, de acordo com Fonseca (2010, p.378), são:

- a) Emissão de partículas  $\alpha$ : São partículas pesadas, com carga elétrica positiva, constituída de 2 prótons e de 2 nêutrons (é o núcleo de um átomo de hélio ionizado). Sua velocidade pode variar de  $3.106 \text{ m/s}$  a  $3.107 \text{ m/s}$ , tendo em média, aproximadamente,  $2.107 \text{ m/s}$  ou 5% da velocidade da luz. As partículas  $\alpha$  tem alto poder de ionização<sup>7</sup>, pois a partícula  $\alpha$  captura 2 elétrons do meio ambiente, tornando-se um átomo de hélio<sup>8</sup>. Possuem pequeno poder de penetração. Feixes de 5MeV podem ser detidos por uma camada de 7 cm de ar, por uma folha de papel ou por uma chapa de alumínio de 0,06 mm de espessura. Causam danos ao ser humano se inaladas ou ingeridas, se incidentes sobre a pele são detidas pela camada de células mortas, causando no máximo queimaduras.

---

<sup>7</sup> Poder de ionização indica o número de íons formados por  $\text{cm}^3$  na trajetória da partícula

<sup>8</sup> $\alpha + 2 e^- = \text{He}$

- b) Emissão de partículas  $\beta$ : São extremamente leves com carga elétrica, de carga negativa, em si tratando de elétrons, que são liberadas a partir conversão de um nêutron em um próton. No caso de existir cargas positivas (prótons) em excesso, é emitida uma partícula  $\beta$  positiva, chamada de pósitron resultante, daí, da conversão de um próton em um nêutron. Portanto a radiação  $\beta$  é constituída emitidas por um núcleo, quando da transformação de nêutrons em prótons (partículas  $\beta$ ) ou de prótons em nêutrons (pósitrons). As partículas  $\beta$  chegam a atingir até 95% da velocidade da luz, ou seja,  $2,85 \cdot 10^8$  m/s. O poder de ionização é bem menor, comparando-se com o das partículas  $\alpha$ . Como as partículas  $\beta$  possuem carga elétrica em modulo bem menor que as partículas  $\alpha$ , a ionização que provocam é bem menor. O poder de penetração destas partículas é bem maior, comparando ao das partículas  $\alpha$ , sendo entre 50 e 100 vezes mais penetrantes, podendo ser detidas por uma chapa de chumbo de 2 mm ou de alumínio de 1 cm tendo massa igual a do elétron. Se um emissor  $\beta$  for ingerido, como acontece nos casos de diagnostico ou terapêutica, os efeitos são mais intensos. Se incidentes sobre o corpo humano, podem penetrar até 2 cm e causar sérios danos.
- c) Emissão de partículas  $\gamma$ : As radiações  $\gamma$  são radiações eletromagnéticas semelhantes aos raios X, por serem constituídas de fótons não possuem massa nem carga elétrica. É produzida, geralmente, por elementos radioativos, que ocorre após a emissão de uma partícula alfa ( $\alpha$ ) ou beta ( $\beta$ ), onde o núcleo resultante dos processos ocorridos ainda possui um excesso de energia e procura estabilizar-se, emitindo esse excesso na forma de uma onda eletromagnética. A velocidade das partículas gama é igual a da luz, ou seja,  $3 \cdot 10^8$  m/s. O poder de ionização das partículas  $\gamma$  é muito pequeno, uma vez que o poder de ionização depende quase que, exclusivamente, da carga elétrica, por isso a radiação  $\gamma$  praticamente não forma íons. As partículas  $\gamma$  são mais penetrantes que os raios X, possuindo comprimentos de onda de 0,1 a 0,001 ângstrom, podendo atravessar milhares de metro no ar, até 25 cm de madeira ou 15 cm de

aço, sendo detidos por placas de chumbo de 5 cm ou paredes de grossas de concreto. Causam danos irreparáveis ao corpo humano podendo atravessá-lo completamente e, devido sua alta energia, podem causar danos ao núcleo das células.

- d) Raios X: Os raios X, conforme Rosa, são emissões eletromagnéticas cuja natureza é semelhante à da luz visível. Seu comprimento de onda pode variar de 0,05 ângstrons até centenas de ângstrons. A energia dos raios X é da ordem do keV, podendo variar de alguns keV e algumas centenas de keV. São produzidos através do freamento de elétrons previamente acelerados até altas velocidades, (uma vez que qualquer carga acelerada emite radiação eletromagnética). Os raios X possuem um alto poder de penetração sendo absorvidos pelos ossos, porém, passam facilmente pelos outros tecidos.
- e) Emissão de nêutrons: A radiação de nêutrons é geralmente proveniente de núcleos radioativos. Os nêutrons são muito mais massivos do que as partículas  $\beta$  (sua massa é próxima à do próton) e não possuem carga elétrica. Na interação com a matéria, os nêutrons só interagem com os núcleos de outros átomos, e as probabilidades relativas dependem, quase que, exclusivamente da energia. O moderador mais eficiente para nêutrons é o hidrogênio, visto que, possui somente um próton em seu núcleo. São classificados como nêutrons lentos (energia  $< 0,5$  eV) e nêutrons rápidos. A emissão nêutron é associada com a fissão nuclear e o processo de fissão libera energia e dois ou três nêutrons. Na física médica, a radiação de nêutrons é considerada a quarta mais perigosa. O perigo da radiação de nêutrons, por vezes ainda mais severo, é a ativação por nêutrons, ou seja, a capacidade da radiação de nêutrons de induzir radioatividade na maior parte das substâncias que encontra, incluindo tecidos humanos. Tal consiste na captura de nêutrons por parte dos núcleos atômicos, os quais são transformados em outros nuclídeos, freqüentemente em radionuclídeos, conforme Eisberg (1979, p.755)

## 2.2 Radiações Não-Ionizantes

Os tipos de radiações não-ionizantes, conforme Medeiros (2011), são classificadas em:

- a) Ondas de Rádio: são radiações de baixa frequência, nas faixas inferiores a 300 GHz, e, conseqüentemente, de grandes comprimentos de onda, geralmente maiores que 1m. São geradas por torres de transmissão de circuitos oscilantes como também por grandes corpos no espaço, como planetas, cometas, nuvens de gás gigantes, etc. A nível atômico não provocam alterações na matéria, sendo invisíveis ao corpo humano como na maioria dos materiais.
- b) Micro-ondas (MW): são geradas por válvulas eletrônicas especiais. Estão compreendidas entre as frequências de 300 MHz a 300 GHz, e comprimentos de onda de 1 m a 1mm. As micro-ondas provocam nas moléculas o efeito de girar e torcionar as moléculas de matéria produzindo calor como resultado destes movimentos. Nesta faixa estão compreendidos os sinais rádio e televisão classificados como UHF (ultra high frequency), SHF (super high frequency) e EHF (extremelly high frequency).
- c) Infravermelho (IR): São geradas por objetos aquecidos, como por exemplo um filamento de lâmpada incandescente e em sua grande maioria, pelo Sol devido a sua elevada temperatura. No infravermelho temos ondas de 0,7  $\mu\text{m}$  a 1000  $\mu\text{m}$  e frequências de 300 GHz a 400 THz. O infravermelho é gerado pela vibração dos elétrons das camadas mais externas de átomos e moléculas. Quando interage com a matéria, as ondas infravermelhas colocam as moléculas em vibração. No nosso dia-a-dia, experimentamos os efeitos dessas interações quando sentimos calor proveniente do Sol, de radiadores, de ferros de passar roupa, e até de nosso próprio corpo.

### **2.3 - Grandezas básicas usadas na área das radiações não ionizantes:**

Em se tratando de radiações ionizantes, trabalha-se basicamente com quatro grupos técnicos: radioatividade, radioterapia, radiodiagnóstico e radioproteção.

No caso da radioatividade o Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes – LNMRI – diz que a grandeza definida para medição da quantidade de transformações que ocorrem numa fonte radioativa, dando origem aos diversos tipos de radiação é a atividade. Como as medições estão relacionadas a amostras que tem determinados volume e massa, muitas vezes são usadas as unidades atividade por unidade de volume e atividade por unidade de massa. De semelhante modo para medir o nível de contaminação superficial usa-se atividade por unidade de área.

Na radioterapia as grandezas utilizadas na calibração dos instrumentos estão divididas pelo tipo de tratamento aplicado: teleterapia ou braquiterapia.

A Teleterapia é uma técnica de radiação de um feixe externo usando irradiações com fótons ou elétrons para destruir células de câncer na superfície ou nas partes mais profundas do corpo. Na área da Teleterapia são usadas as grandezas padronizadas no LNMRI são os kerma<sup>9</sup> no ar (kineticenergyrationmassabsorption) e a dose absorvida na água. Os padrões nacionais são calibrados no Bureau International des Poids et Mesures – BIPM<sup>10</sup>.

A técnica da Braquiterapia utiliza fontes de radioativas encapsuladas na qual são inseridas muito próximas ou dentro do tumor, fornecendo uma alta taxa de dose em tecidos próximos a fonte, sem prejudicar as estruturas adjacentes, segundo afirma Rosa.

Para calibração de fontes de Braquiterapia em termos de kerma no ar existem duas possibilidades. Uma requer que a calibração das fontes seja feita em um laboratório primário em intensidade de kerma no ar e sua calibração seja transferida através do uso de câmaras de ionização do tipo poço. A outra maneira requer que as medidas sejam feitas com uma câmara de ionização com fator de calibração rastreável a um laboratório primário. Esta segunda opção é usada no LNMRI para fornecer a calibração da semente de <sup>192</sup>Ir HDR – Isótopo 192 do elemento Iridio de Grande alcance dinâmico.

No setor do radiodiagnóstico Médico e Odontológico, a grandeza fundamental é o kerma no ar. A partir do kerma no ar pode-se determinar as demais grandezas de

---

<sup>9</sup>Kerma significa, em português, energia cinética absorvida por unidade de massa.

<sup>10</sup> Escritório Internacional dos Pesos e das Medidas

uso prático. Atualmente as diferentes grandezas propostas partem das grandezas dosimétricas básicas (kerma no ar, dose absorvida ou exposição) sempre levando em conta as condições em que as medidas são feitas e o meio em que são expressos os valores da grandeza.

A grandeza fundamental, na radioproteção, em que os padrões nacionais de radiação de fótons são calibrados é o kerma no ar. A partir do kerma no ar, podem-se determinar todas as grandezas operacionais de uso corrente na radioproteção cujas definições e fatores de conversão encontram-se a seguir.

O kerma ( $K$ ) é uma grandeza convenientemente usada nas calibrações dosimétricas que pode ser inclusive usada para nêutrons.

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} \quad (1)$$

Onde  $E_{tr}$  é a soma de todas as energias cinéticas iniciais de todas as partículas carregadas liberadas por partículas neutras (radiação indiretamente ionizante) ou fótons em um material de massa  $dm$ . Apesar de ser muito utilizado no ar, o kerma pode ser utilizado em qualquer material.

A unidade de kerma, no SI, é o joule por quilograma (J/kg) denominado gray (Gy).

## 2.4 Grandezas básicas usadas na área das radiações ionizantes:

### 2.4.1 Atividade (A)

Segundo o LNMRI, atividade ( $A$ ) é o quociente  $dN/dt$ , de uma quantidade de núcleos radioativos num estado de energia particular, onde  $dN$  é o valor esperado do número de transições nucleares espontâneas deste estado de energia num intervalo de tempo  $dt$ .

$$A = \frac{dN}{dt} \quad (2)$$

A unidade da atividade no Sistema Internacional (SI) é o becquerel, cujo símbolo é (Bq). A unidade antiga usada era o curie (Ci) e suas equivalências são:

$$1\text{Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ desintegrações/segundo}$$

$$1\text{Bq} = 1 \text{ desintegração/segundo}$$

### 2.4.2 Exposição (X)

Chamamos de exposição a razão entre todas as cargas de elétrons freados em um volume  $\Delta V$  de ar, produzidos por radiação gama ou por raios X com massa  $\Delta m$  do ar desse volume.

Mede o número de ionizações produzidas por radiação  $\gamma$  (gama) ou X no ar. Se a relacionarmos com um intervalo de tempo medimos então a taxa de exposição.

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (3)$$

Para medirmos exposição X, a unidade de medida é o roentgen [R].

$$1 \text{ R} = 1,61 \times 10^{12} \text{ íon/g} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

O Roentgen aplica-se a fótons e seu uso é controvertido para energias acima de 3MeV.

### 2.4.3 Dose absorvida (D)

Expressa a energia absorvida em um ponto. A dose absorvida (D) é o rad.

$$D = \frac{d\mathcal{E}}{dm} \quad (4)$$

onde  $d\mathcal{E}$  é o valor esperado de energia média depositada pela radiação ionizante na matéria de massa  $dm$ , num ponto de interesse.

A unidade no Sistema Internacional (SI) é o joule/quilograma (J/kg) denominada gray (Gy). É o indicativo da probabilidade de um efeito futuro, que depende da qualidade da radiação. A Comissão Internacional de Proteção Radiológica ICRP26<sup>11</sup> diz quais fatores de qualidade modificam o efeito biológico, analisando as características das radiações. São os chamados fatores de peso da radiação ( $w_r$ ). São tais fatores que possibilitam a avaliação numérica da probabilidade da ocorrência de algum dano biológico.

### 2.4.4 Dose equivalente (H)

---

<sup>11</sup> International Commission on Radiological Protection (ICRP26), 1996, Recommendations on the ICRP, Oxford, Pergamon

A dose absorvida média em um órgão ou tecido é um indicador da probabilidade de algum efeito imediato. Mas esta probabilidade depende da qualidade da radiação, ou seja, tipos diferentes de radiação, mesmo tendo a mesma dose absorvida, podem ocasionar diferentes efeitos biológicos.

Para resolvermos este dilema foi necessário introduzir uma nova grandeza que primeiramente foi chamada de “Dose de Efeito Biológico”, depois passando a se chamar “Dose RBE” e finalmente designada de “Dose equivalente”.

Sob o ponto de vista biológico, já se sabe que não são iguais os efeitos produzidos pelos vários tipos de radiações ionizantes porque possuem Transferência Linear de Energia (LET<sup>12</sup>) e Eficácia Relativa Biológica (RBE<sup>13</sup>) diferentes.

O RBE leva em conta as diferenças de valores do LET e do referido efeito biológico.

$$H = D_t \cdot W_r \quad (5)$$

A dose equivalente H é o produto da dose absorvida D num ponto do tecido ou órgão t, pelo fator de peso  $W_r$  da radiação.

No SI, a unidade de dose equivalente é o joule/quilograma (J/kg) denominada sievert(Sv).

Os Fatores de Peso da Radiação ( $W_r$ ) foram definidos pela ICRP para representar os valores da RBE. Os fatores de peso da radiação (Ver tabela 1) independem do tecido ou órgão irradiado e são válidos tanto para radiação externa quanto para radiação interna. Os  $W_r$  são definidos por tipos e faixas de Energia.

Tabela 1: Fatores de Peso da Radiação

Tipos e Faixas de Energia	$W_r$
Fótons de todas as energias	1
Elétrons e muons, de todas as energias	1
Nêutrons com energia < 10 keV	5
= 10 keV a 100 keV	10
> 100 keV a 2MeV	20
> 2 MeV a 20 MeV	10

<sup>12</sup> Linear Transference of Energy

<sup>13</sup> Relative Biological Effectiveness

> 20 MeV	5
Prótons com energia > 2 MeV	5
Partículas alfa	20
Fragmentos de Fissão e Núcleos pesados	20

#### 2.4.5 Dose Efetiva (E)

No ano de 1977 o ICRP introduziu o conceito de “equivalente de dose efetiva” como uma dose média ponderada por fatores de pesos derivados dos riscos de morte para trabalhadores causados por câncer nos órgãos irradiados. A dose efetiva (E) é a soma ponderada das doses equivalentes em todos os tecidos ou órgãos do corpo. Esses fatores são independentes do tipo e da energia da radiação existente ou incidente no corpo. Obtém-se a dose efetiva através da expressão:

$$E = \sum_T W_T \cdot H_T \quad (6)$$

onde  $W_T$  é o fator de peso para o tecido T e  $H_T$  é a dose equivalente média no tecido ou órgão a ele atribuído. Mede-se dose efetiva, no SI, em sievert cujo símbolo é o Sv. Deve-se enfatizar que a “dose efetiva” é destinada ao uso em Radioproteção, sendo incluída a avaliação de riscos em termos gerais. Para que possamos fazer uma estimativa das possíveis conseqüências da exposição de uma pessoa ou um grupo deve-se usar o RBE e os respectivos coeficientes de probabilidade relacionados a essa pessoa ou grupo. Recentemente o ICRP, tomando ciência de novas informações sobre danos biológicos, achou oportuna a modificação dos fatores de peso do equivalente de dose efetiva.

Tabela 2: Fator de Peso para os Tecidos ou Órgãos<sup>14</sup>

Tecido ou Órgão	WT[a]	
	ICRP 26	ICRP 60
Gônadas	0,25	0,20
Medula óssea (vermelha)	0,12	0,12

<sup>14</sup> Dados obtidos da Comissão Nacional De Energia Nuclear

Cólon [b]	-	0,12
Pulmão [c]	0,12	0,12
Estômago	-	0,12
Bexiga	-	0,05
Mama	0,15	0,05
Fígado	-	0,05
Esôfago	-	0,05
Tireóide	0,03	0,01
Pele	-	0,01
Superfície óssea	0,03	0,01
Restantes [d]	0,30	0,05

[a] Esses valores foram desenvolvidos para uma população de referência composta por número igual de indivíduos de ambos os sexos e abrange uma ampla faixa etária. Na definição de dose efetiva esses fatores se aplicam a IOE e a indivíduos do público de qualquer sexo ou idade.

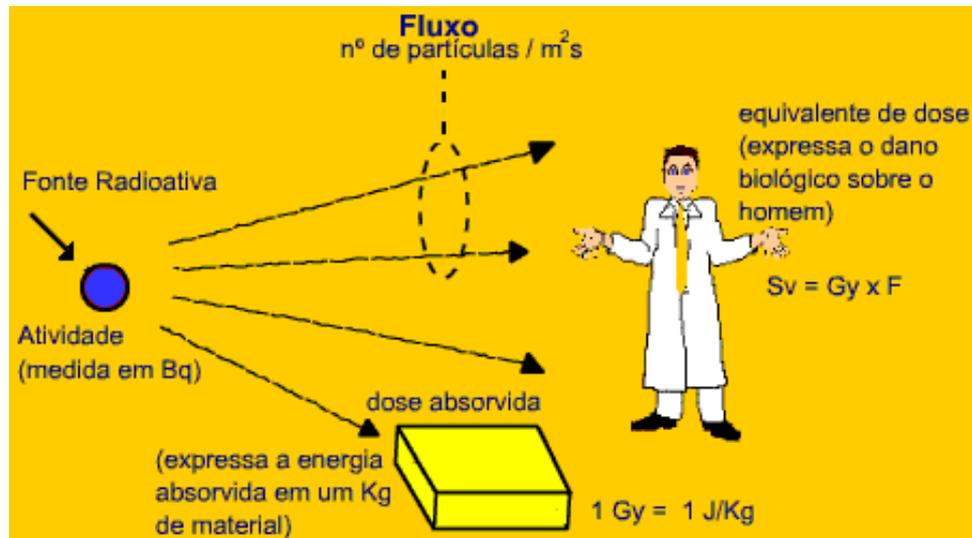
[b] Dose calculada como média ponderada por massa, para intestino grosso superior e inferior:  $H_{C\acute{o}lon} = 0,57 H_{IGS} + 0,43 H_{IGI}$

[c] Região torácica da área respiratória.

[d] Para fins de cálculo, o grupo de tecidos restantes é composto das glândulas supra-renais, cérebro, região extratorácica da área respiratória, intestino delgado, rim, músculo, pâncreas, baço, timo e útero. Nos casos em que um dos tecidos remanescentes mais expostos receba uma dose equivalentemais alta dentre todos os órgãos, deve-se aplicar um fator de peso de 0,025 a esse tecido ou órgão e um fator de 0,025 ponderado por massa aos demais restantes.

Em resumo a relação entre as unidades radiológicas pode ser expressa pela figura 1:

Figura 1: Relação entre as unidades radiológicas



Fonte: figura disponível em <http://www.if.ufrgs.br/cref/radio/indexe.htm>  
 acesso em 18/01/2018

Tabela 3:Grandezas e unidades físicas usadas nas radiações e suas relações

Grandeza	Unidade Antiga	Unidade Atual do Sistema Internacional
Exposição	Roentgen (R)	coulomb/quilograma (C/kg)
	$1 R = 2,58 \times 10^{-4} C/kg$	
Dose Absorvida	Rad	gray (Gy)
	$1 rad = 0,01 Gy = 0,01 J/kg$	
Dose Equivalente	REM	sievert (Sv)
	$1 rem = 0,01 Sv = 0,01 J/kg$	
Atividade	Curie (Ci)	becquerel (Bq)
	$1 Ci = 3,7 \times 10^{10} Bq = 3,7 \times 10^{10} s^{-1}$	