

## Processos Quânticos em Sistemas Biológicos

NAHAS, Antonio Ricardo<sup>1</sup>

RU: 240815

PADILHA, Eliandro José <sup>2</sup>

### RESUMO

A mecânica quântica é fundamental para a compreensão dos mecanismos moleculares na física e na química. Recentes pesquisas e estudos estão trazendo fortes evidências de que ela também pode estar envolvida na compreensão dos mecanismos moleculares dos sistemas biológicos, como exemplos: a transferência de energia na fotossíntese, a navegação dos pássaros usando o campo magnético terrestre e tunelamento de elétron e hidrogênio em reações bioquímicas. Nesta revisão foi realizado um levantamento bibliográfico dos principais estudos e pesquisas sobre a aplicação dos conceitos da mecânica quântica no entendimento de alguns processos biológicos. Após levantamento realizado em revistas especializadas, teses, artigos, periódicos e publicações acadêmicas variadas concluiu-se que muitos fenômenos biológicos podem ser entendidos e compreendidos dentro de uma nova perspectiva científica integrativa conhecida como biologia quântica.

**Palavras-chave:** Coerência Quântica. Emaranhamento. Tunelamento Quântico.

### 1 INTRODUÇÃO

Em meados do século XX, o físico austríaco Erwin Schrödinger (1887-1961), apresentou os conceitos iniciais para o surgimento da biologia quântica. Ele partiu do fato, de ser a matéria viva, dotada de alto grau de complexidade. Ele coloca que a física clássica é incapaz de entender as bases físicas dos fenômenos biológicos, ao contrário da mecânica quântica.

Com o avanço do interesse científico por essa área, muitos estudos foram surgindo. Fleming (2011), por exemplo, obteve evidências de que macromoléculas envolvidas na fotossíntese apresentam oscilações eletrônicas passíveis de descrição apenas pela física quântica. Com isso, a fotossíntese se tornou o primeiro fenômeno

---

<sup>1</sup> Aluno do Centro Universitário Internacional UNINTER. Artigo apresentado como Trabalho de Conclusão de Curso. 06-2021

biológico a ser considerado resultado legítimo da mecânica quântica. A transferência de energia de excitação e a transferência de carga na fotossíntese são as áreas mais bem estabelecidas da biologia quântica.

Outra área de investigação mais recente é o estudo da catálise enzimática, que muitas vezes depende do acoplamento de elétrons e prótons para controlar o transporte de múltiplas cargas.

Também é conhecido que certas bactérias, algas e plantas obtêm energia a partir dos fótons absorvidos pela radiação solar, posteriormente transportada por diversas proteínas, para posterior aproveitamento químico. O transporte dessa energia acontece através de um efeito conhecido como coerência quântica.

Antes do surgimento da biologia quântica, os efeitos quânticos eram caracterizados como fenômenos ultrarrápidos, ocorrendo apenas em ambientes controlados e com temperaturas muito baixas.

As descobertas da biologia quântica estão impactando diferentes áreas do conhecimento, inclusive a medicina, pois, o entendimento de como ocorrem os fenômenos quânticos poderá também influenciar na compreensão sobre os mecanismos das doenças.

A biologia quântica refere-se às aplicações da mecânica quântica e da química teórica aos processos biológicos. Muitos deles envolvem a conversão de energia em formas que são utilizáveis para transformações químicas, sendo de natureza quântica. Tais processos envolvem reações químicas, absorção de luz, formação de estados eletrônicos excitados, transferência de energia de excitação e transferência de fótons, elétrons e prótons (íons de hidrogênio).

Neste trabalho de revisão foi realizado um levantamento bibliográfico (revistas especializadas, teses, artigos e publicações acadêmicas variadas) sobre os principais estudos e pesquisas relacionados à aplicação dos conceitos da mecânica quântica no entendimento de alguns processos biológicos.

Um novo campo emergente, conhecido como biologia quântica, tem como proposta a utilização dos conhecimentos da mecânica quântica para investigação de

fenômenos relacionados aos sistemas vivos. Essa proposta exige uma visão integrativa e interdisciplinar, envolvendo os conhecimentos da biologia, química e física.

## **2 BIOLOGIA QUÂNTICA**

### **2.1 O que é a biologia quântica?**

A Biologia Quântica é uma nova ciência que investiga o papel dos efeitos quânticos em sistemas biológicos. Os principais temas investigados pela Biologia Quântica são: a colheita de luz na fotossíntese, tunelamento quântico na catálise de enzimas e emaranhamentos quânticos variados, sendo um dos mais intrigantes, o desenvolvido na magneto-recepção da migração de pássaros.

#### **2.1.1 Fotossíntese**

Pigmentos fotossintéticos coletam luz solar e transferem a energia na forma de excitação eletrônica para o centro de reação para separação de carga que impulsiona os processos bioquímicos (FLEMING, 2011).

Antenas coletoras de luz são complexos de proteínas e pigmentos que absorvem fótons solares, produzindo excitações eletrônicas<sup>2</sup> que são transferidas, através de outros complexos, para o centro de reação. Lá é realizada a conversão da energia fotossintética.

O processo de transferência tem quase 100% de eficiência. Essa alta eficiência pode, em alguns organismos fotossintéticos, ser compreendida pela coerência quântica no processo de transporte (NUSSENZVEIG, 2015). O problema é que efeitos quânticos e organismos vivos parecem ocupar domínios completamente diferentes.

Os primeiros são observados apenas em uma escala nanométrica, cercados pelo vácuo rígido, com temperaturas baixíssimas e um ambiente laboratorial

---

<sup>2</sup> O tunelamento de elétrons desempenha um papel importante.

rigorosamente controlado. Os últimos habitam o mundo macroscópico, quente, “confuso” e menos controlado. (BALL, 2011).

Segundo Ball (2011), "um fenômeno quântico, como a coerência, que ocorre quando um sistema quântico existe numa sobreposição de dois ou mais estados simultâneos, não duraria um microssegundo no reino tumultuado da célula".

A questão que se coloca é: como a coerência quântica pode durar o suficiente para ser útil na fotossíntese? Na temperatura ambiente, o caos molecular que envolve a célula pode destruir, instantaneamente, a coerência, produzindo a decoerência.

Simulações computacionais realizadas por Lloyd (2008) sugerem que o ruído aleatório no ambiente pode aumentar a eficiência da transferência de energia na fotossíntese, ao invés de degradá-la.

Lloyd (2008) também sugere que,

*Um éxciton pode, em algumas situações, ficar aprisionado em determinados locais da cadeia fotossintética, mas as simulações sugerem que o ruído ambiental pode agitá-lo de forma suave, o suficiente para evitar a destruição da sua coerência. (LLOYD, 2008, p. 2).*

Para ele, o ambiente liberta o éxciton e permite que ele chegue aonde ele está indo. Além disso, dados experimentais obtidos por duas equipes de pesquisadores liderados por Fleming descobriram que é possível a existência de estados quânticos coerentes em temperatura ambiente.

Ball (2011) coloca que a coerência não é apenas encontrada nas condições laboratoriais criogênicas, podendo ser realmente importante para o processo de fotossíntese.

A colheita natural de luz depende da dinâmica de estado excitado ultrarrápido, incluindo transferência de energia e separação de carga, onde a superposição e a coerência quântica desempenham importantes funções. Segundo Ball,

Os fótons, provenientes do Sol, chegam de forma aleatória às moléculas de clorofila e outros pigmentos de “antena” capazes de absorção de luz. Eles se

aglomeram dentro das células de cada folha e de cada bactéria fotossintética. A energia dos fótons é depositada de forma não aleatória, sendo a luz canalizada e direcionada, através de um fluxo constante, ao centro de reação fotossintética celular. Assim sendo, ela é utilizada com máxima eficiência convertendo o dióxido de carbono em açúcares. (BALL, 2011, p. 2).

Os fótons atingem uma molécula-antena na célula, disparando ondulações de elétrons energizados (éxcitons), que passam de uma molécula de clorofila para outra, até alcançarem o centro da reação principal (BALL, 2011). O interessante é que o percurso por eles realizados não acontece através de saltos aleatórios e não-direcionados.

As recentes pesquisas têm mostrado que os éxcitons são coerentes, podendo significar que as ondas de coerência quântica podem existir em dois ou mais estados ao mesmo tempo. Segundo Ball,

Os éxcitons coerentes seriam capazes de se mover através da "floresta" de moléculas de "antena", por duas ou mais rotas simultaneamente. Na verdade, eles poderiam simultaneamente explorar uma infinidade de opções possíveis e selecionar automaticamente o caminho mais eficiente para o centro da reação fotossintética na célula. (BALL, 2011, p. 2).

Para Fleming (2011), "[...] modelos baseados na teoria quântica são cruciais para a compreensão do processo primário da fotossíntese."

Nos complexos fotossintéticos,

[. . .] as moléculas de pigmento são empacotadas juntas, dispostas de forma que os acoplamentos entre as suas transições eletrônicas são significativos. Como resultado, as excitações ópticas de um complexo fotossintético são descritas pelo modelo de éxciton de Frenkel. (FLEMING, 2011, p. 40).

Para um sistema feito de  $N$  cromóforos é considerado o Hamiltoniano:

$$H_e = \sum_1^n E_n |n\rangle \langle n| + \sum_n J_{nm} (|n\rangle \langle m| + |m\rangle \langle n|) \quad (2.0)$$

Onde  $n$  é um estado molecular excitado do  $n$ -ésimo cromóforo,  $E_n$  é a energia de transição de estado molecular do cromóforo (energia do local) e  $J_{nm}$  é o acoplamento excitônico entre os dipolos de transição do  $n$ -ésimo e  $m$ -ésimo cromóforos. Em química, um cromóforo é qualquer molécula, ou parte de uma molécula, responsável pela cor do material. Quando a luz atinge um cromóforo, a excitação de um elétron faz com que sejam emitidos fótons de uma cor específica.

Esses acoplamentos excitônicos, de acordo com Fleming,

[...] são cruciais para a transferência de energia de excitação. Além disso, quando acoplamentos excitônicos são significativos, os estados próprios de energia, que diagonalizam o Hamiltoniano, devem ser considerados para descrever as propriedades ópticas e a transferência de energia de excitação dentro do complexo, levando à chamada base de éxciton. (FLEMING, 2011, p. 40)

Os éxcitons são normalmente superposições quânticas de vários estados moleculares excitados dentro do complexo. Como resultado, um fóton que é absorvido em um complexo de coleta de luz, produz uma excitação coletiva no complexo.

Segundo Fleming (2011), os éxcitons podem perder energia à medida que são transferidos, o que significa que quanto mais tortuosas são as suas rotas entre as moléculas de clorofila, menos energia chega ao centro de reação.

Os físicos sugerem que esse desperdício pode ser evitado se o processo de transferência for quântico coerente, ou seja, se os éxcitons puderem viajar como ondas, eles podem experimentar simultaneamente todos os caminhos para o centro de reação, seguindo apenas a rota mais eficiente.

### 2.1.2 Tunelamento quântico em sistemas biológicos

Outro importante fenômeno estudado pela biologia quântica é o efeito túnel em sistemas biológicos. Segundo Wikipédia, "~~tunelamento quântico (ou efeito túnel) é um fenômeno da mecânica quântica no qual as partículas podem transpor um estado de energia classicamente proibido. Uma partícula pode escapar de regiões cercadas por barreiras de potenciais, mesmo se a sua energia cinética for menor que a energia potencial da barreira~~".

O tunelamento envolvendo a transferência de partículas de luz fornece uma rota alternativa para as reações clássicas sobre a barreira, resultando em um aumento significativo na taxa de reação. Também é uma forma de direcionar a transferência de elétrons através de proteínas.

O primeiro relato de tunelamento em sistemas biológicos veio das reações de transferência de elétrons em proteínas. Já se sabe, que a transferência de elétrons

de longo alcance, nas escalas de tempo de milissegundos a microssegundos, desempenha importantes papéis nas vias de transdução de energia da vida.

Ball (2011) cita a ocorrência, em algumas reações catalisadas por enzimas, do movimento dos prótons de uma molécula para outra, através do tunelamento quântico, no qual uma partícula passa por uma barreira energética ao invés de usar a energia para escalada sobre ela.

As teorias tradicionais da catálise enzimática sustentam que as proteínas aceleram as reações diminuindo a energia de ativação, mas alguns pesquisadores sustentam que o tunelamento quântico tem um papel muito importante neste processo. A estrutura dos sítios ativos das enzimas podem ter evoluído para aproveitamento deste interessante fenômeno.

Klinman (1989) descobriu que durante a catálise da oxidação do álcool benzílico e muitas outras reações, a transferência de hidrogênio ocorre com a ajuda do tunelamento. Segundo a pesquisadora,

[...] durante a catálise da oxidação do álcool benzílico e muitas outras reações, a transferência de hidrogênio ocorre com a ajuda do tunelamento. Isso ajuda a explicar por que o deutério e o trítio costumam segurar as reações - partículas mais pesadas são piores em tunelamento e podem dificultar o tunelamento para outras partículas na mesma molécula. (KLINMAN, 1989 p. 1327).

Durante a catálise, as enzimas mudam a conformação trazendo os locais doadores e receptores de hidrogênio, próximos o suficiente (cerca de 0,27 nanômetros um do outro), facilitando o tunelamento.

A sensação do cheiro, que pode ser proveniente da detecção bioquímica de vibrações, é outro fenômeno associado ao tunelamento de elétrons entre a molécula responsável pelo odor e o receptor.

Como já citado, acreditava-se que os fenômenos quânticos geralmente aconteciam em sistemas com baixas temperaturas, secos, nas escalas atômicas e molecular, enquanto, fenômenos biológicos, em ambientes úmidos e ruidosos, na temperatura ambiente.

### 2.1.3 Emaranhamento quântico em sistemas biológicos

A mecânica quântica é uma estrutura matemática que identifica um sistema físico isolado com um estado quântico, caracterizando-o completamente. É denotado por  $|\psi\rangle$  em um espaço de Hilbert que contém todos os estados disponíveis.

A evolução temporal de um sistema, descrito por um vetor de estado  $|\psi\rangle$ , obedece à equação de Schrödinger:

$$i\hbar \frac{d}{dt} |\psi\rangle = H(t) |\psi\rangle \quad (2.1)$$

Onde  $\hbar$  é a constante de Planck reduzida e  $H(t)$  é o Hamiltoniano que representa os níveis de energia do sistema e a interação entre as partes do sistema.

Nesse contexto, a combinação linear de dois estados quânticos também descreve o sistema, dando origem aos estados de superposição. O emaranhamento é consequência direta do princípio da superposição, aplicado em sistemas físicos compostos por dois ou mais subsistemas.

Se o conceito de superposição for estendido a dois sistemas, por exemplo, dois elétrons, é possível formar superposições de estados correspondentes aos dois. Isso é conhecido como emaranhamento quântico.

Abaixo tem-se a representação matemática deste processo.

$$|\psi_{12}\rangle = H_1 \otimes H_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} ( (|u\rangle \otimes |d\rangle) H_1 \otimes H_2 \pm (|a\rangle \otimes |u\rangle) ) H_1 \otimes H_2 \quad (2.2)$$

Onde  $H$  representa o espaço de Hilbert<sup>3</sup>.

O emaranhamento geralmente está relacionado ao spin quântico, propriedade das partículas elementares que determina seu comportamento em um campo magnético. Segundo Arantes (2018),

O emaranhamento quântico é um fenômeno que ocorre quando grupos de partículas (ou ondas) são gerados ou interagem, de tal maneira, que o estado quântico de cada partícula ou onda não pode ser descrito

---

<sup>3</sup> É um espaço vetorial completo dotado de produto interno.

independentemente, pois, depende do conjunto, por mais distantes que as partículas (ou ondas) estejam entre si. (ARANTES, 2018, n. 1).

O emaranhamento é uma propriedade que envolve correlações quânticas entre sistemas distintos e o conceito de coerência quântica, que será visto no próximo capítulo, quantifica a relação entre estados em uma superposição. Esse fenômeno, para surpresa de muitos cientistas, foi encontrado em sistemas vivos. Por exemplo, nas bactérias sulfurosas e no sistema de navegação espacial dos pássaros.

### 2.1.3.1 *Emaranhamento quântico entre bactérias sulfurosas*

Bactérias sulfurosas verdes são encontradas em ambientes anaeróbicos ricos em compostos de enxofre. Elas são fotossintéticas e capazes de sobreviver em locais extremos, onde a intensidade da luz cai para algumas centenas de fótons por segundo. Essas bactérias desenvolveram clorossomos (complexos de antenas) capazes de absorver luz criando um éxciton, cuja viagem para uma placa de base de proteína, ligada ao clorossomo, pode impulsionar reações químicas após chegar ao seu centro.

Um experimento realizado por Marletto (2018) revelou que o forte acoplamento entre a bactéria e a luz, quando ambas são tratadas de forma quântica, pode indicar emaranhamento entre as bactérias (modeladas como dipolos) e a luz quantizada (modelada como um único oscilador harmônico quântico).

Shi Kumar e Lee (2017) realizaram um experimento com proteínas fluorescentes verdes, responsáveis pela bioluminescência e usadas na pesquisa médica. Nesse experimento foram entrelaçados os fótons emitidos pelas moléculas fluorescentes dentro de uma estrutura com forma de barril de uma proteína de alga. Foi usada a técnica da "mistura de quatro ondas", onde três feixes de luz se misturam em um meio não-linear para criar um quarto feixe de luz.

Um emaranhamento entre pares de fótons, chamado de emaranhamento de polarização, foi obtido neste experimento. Neste processo, as polarizações dos fótons são compartilhadas, mostrando que as direções de oscilação das ondas de luz estão inextrincavelmente ligadas. Também descobriram que o emaranhamento foi protegido

pela estrutura em forma de barril que circundava as moléculas fluorescentes. Essa proteção foi capaz de evitar a decoerência.

Segundo Shi (2017, p. 8), "o estado preparado é menos sensível à decoerência ambiental por causa da estrutura protetora do barril  $\beta$  que encapsula o fluoróforo na proteína".

### 2.1.3.2 *Emaranhamento quântico na orientação espacial dos pássaros*

O mecanismo que permite que as aves migratórias sintam o campo magnético terrestre para se orientar durante o voo é um dos temas mais fascinantes da biologia quântica. Segundo recentes estudos, a incidência de luz nos olhos do pássaro pode quebrar as ligações químicas produzindo pares de radicais livres com spins (momentos magnéticos) bem definidos.

As reações dentro da proteína (conhecida como criptocromo) geram um par de moléculas, cada uma com um elétron solitário. Esses pares de radicais livres podem se acoplar de duas formas distintas, dependendo da orientação de seus spins: o singleto e o tripleto.

Os elétrons, que podem estar emaranhados entre si, ocupam um dos dois estados: um estado "singleto", significando que a direção de giro de um está relacionada à direção de giro do outro, de modo que os spins são antiparalelos; ou um estado "tripleto", no qual os dois elétrons tendem a ter spins próximos ao paralelo.

No estado singleto, os dois radicais têm spins com orientações opostas, enquanto no estado tripleto, os spins dos radicais têm mesma orientação. O par radical oscila entre esses dois estados, sendo que, a probabilidade de encontrá-lo, em um estado ou outro, é influenciada pela direção dos campos magnéticos.

Como as energias destes dois estados são muito próximas, o sistema fica fazendo transições entre eles, produzindo uma oscilação quântica coerente que persiste por alguns microsegundos. Os estados singleto e tripleto do par radical estão associados a diferentes reações bioquímicas, portanto, os rendimentos dos produtos dessas reações podem fornecer informações sobre a direção de um campo magnético.

As formas singleto e tripleto têm propriedades químicas distintas, portanto, a fração de cada um, na composição do estado oscilante, determina a reação química que ocorrerá. O mecanismo do par radical pode ser resumido em três etapas principais:

1. Um fóton incidente em uma molécula causa a transferência de elétrons e a formação de pares.
2. O par radical, originalmente no estado de spin singleto, interconverte-se entre os estados singleto e tripleto sob a influência dos efeitos Zeeman<sup>4</sup> hiperfino e geomagnético nuclear.
3. A recombinação dependente do spin leva a algum estado de sinalização que o pássaro interpreta como uma diretiva espacial.

A continuidade desses processos pode influenciar a sinalização neural da retina do pássaro, fornecendo a base para a magneto-recepção.

Segundo Hore (2016, p. 5), "como consequência, e como as reações de recombinação radical conservam o spin, as interações magnéticas fracas podem afetar o rendimento de uma conformação da proteína que poderia atuar como um estado de sinalização".

Tem-se, portanto, um sistema altamente instável. Uma vez que a estranheza (de ambos radicais) foi criada simultaneamente por aquele elétron solto, os spins de um elétron, em cada molécula de criptocromo, ficam travados um em relação ao outro, ficando o par radical em estado de emaranhamento. Este estado é extremamente frágil e temporário, sobrevivendo apenas 100 microsegundos (1/10000 de segundo), mas durante esse breve instante de tempo, o par radical estará em um dos dois estados.

---

<sup>4</sup> O efeito Zeeman consiste no deslocamento das linhas espectrais de um sistema (átomos, moléculas, defeito, impurezas em cristais, etc.) em vários componentes pela ação de um campo magnético.

A suspeita é a de que o campo magnético da Terra afeta a quantidade de tempo que as moléculas passam em qualquer um dos estados. As mudanças na duração desses estados, de alguma forma, podem informar ao pássaro onde ele está.

#### 2.1.4 Coerência quântica em sistemas biológicos

##### 2.1.4.1 O que é coerência quântica?

Luz coerente é aquela formada por ondas de mesma frequência e direção, capazes de manterem uma relação de fase constante entre si. A coerência é uma importante propriedade que permite interferência estacionária, isto é, constante no tempo e espaço.

Pesquisas recentes sugerem a existência dos biofótons, partículas de luz com alto grau de ordenamento e coerência, um tipo de laser biológico. Devido a esse alto grau de ordem, esse laser pode transmitir informações pelo organismo.

Segundo Bishof (2005),

Biofótons consistem em luz com alto grau de ordem, ou seja, luz laser biológica. Essa luz é muito silenciosa e mostra uma intensidade extremamente estável, sem as flutuações normalmente observadas na luz. Por causa de sua força de campo estável, suas ondas podem se sobrepor e, em virtude disso, tornam-se possíveis efeitos de interferência que não ocorrem na luz comum. Devido ao alto grau de ordem, a luz laser biológica pode gerar e manter a ordem e transmitir informações no organismo. Na pesquisa de biofótons, a propriedade de coerência aparece principalmente na "decaência hiperbólica" da chamada "emissão induzida". Dois tipos de medições são usados na pesquisa de biofótons. Na emissão espontânea de uma amostra é praticamente impossível fornecer evidências de coerência. (BISHOF, 2005, p. 2).

Portanto, a medição da "emissão induzida" é a mais indicada, pois ela torna possível determinar o grau de coerência da luz emitida pelo organismo.

Neste processo, a amostra é iluminada por um breve *flash* de luz, antes da medida do observador, de modo que a luz absorvida é novamente emitida. Fazendo isso, é possível observar a emissão de biofóton de tecido vivo. Um processo de decomposição muito prolongado que pode ter a duração de minutos até horas. O declínio desacelera continuamente, mas a emissão não é cessada.

Popp (2002) mostrou que o comportamento decadente (curva hiperbólica) é a evidência da coerência da emissão medida, indicando que a luz é armazenada no tecido.

Swain (2006), coloca que existem dois processos significativos relacionados à coerência quântica, em grande escala, em sistemas vivos. Segundo ele,

Existem duas correntes principais de pensamento que sugerem efeitos mecânicos quânticos macroscópicos associados com o estado de vida. Uma é a sugestão de Herbert Fröhlich que espera excitações coerentes na região de micro-ondas do espectro, devido a acoplamentos não lineares de dipolos biomoleculares - sugestão que talvez seja mais desenvolvida teoricamente do que experimentalmente investigada. A outra é a observação de Fritz Popp de que as estatísticas de foto-contagem de bioluminescência ultrafraca (biofótons) ao redor da região visível do espectro, e mais outros dados, sugerem um componente coerente ligado ao estado de vida. (SWAIN, 2006, p. 3).

#### 2.1.4.2 *Entropia negativa e coerência quântica*

Schrödinger coloca que a matéria viva consegue se esquivar, ao contrário da matéria inanimada, do decaimento para o equilíbrio termodinâmico (entropia). Segundo ele, "em biologia temos uma situação inteiramente diferente. Um só grupo de átomos, existindo em uma cópia apenas, produz eventos ordenados, maravilhosamente afinados entre si e com o ambiente, de acordo com as leis mais sutis".

Também coloca que devemos estar preparados para a descoberta de que a matéria viva funciona de uma forma que não pode ser reduzida às leis comuns da física. E que o alto nível de organização das células pode ser mantido graças a um processo contínuo de extração de entropia negativa do ambiente pelo organismo.

Ele também reconhece que o sistema vivo é um sistema essencialmente aberto, mantido por troca contínua de energia e matéria com o meio ambiente. Por isso, a importância de uma teoria termodinâmica (de sistemas abertos) para sistemas biológicos.

Hebert Fröhlich (1950) revolucionou a biofísica ao introduzir o conceito de coerência em sistemas vivos. Segundo ele, a radiação coerente de luz em sistemas biológicos tem intensidade estável e flutuação mínima, sendo capaz de

transferir informações em sistemas vivos. Com base na física quântica e termodinâmica de não-equilíbrio (propriedades energéticas de sistemas abertos que trocam energia e/ou matéria com o meio ambiente), Fröhlich propôs uma teoria biofísica do estado vivo, baseada em oscilações coerentes.

Coerência é um estado físico onde todos os componentes oscilam coletivamente em fase e criam uma ordem dinâmica de longo alcance. Estruturas eletricamente polares de biomoléculas, que contêm cargas elétricas, podem gerar, quando vibram, campos eletromagnéticos endógenos coerentes. A maioria das proteínas são estruturas eletricamente polares e tipicamente imersas em água, um líquido altamente polar.

Quando a energia metabólica excede um nível crítico, essas estruturas polares entram em um estado estacionário de vibração, não linear. A energia é armazenada de uma maneira altamente ordenada, como uma excitação coerente. Grandes quantidades de energia disponibilizadas por atividades metabólicas podem originar estados quânticos coerentes que resultam em radiação eletromagnética (micro-ondas).

Conseqüentemente, estados quânticos coerentes de grande alcance, semelhantes aos observados em supercondutividade e em lasers, chamados de condensados de Bose-Einstein, podem existir mesmo nas altas temperaturas de sistemas biológicos.

Segundo Popp (2002),

É um campo holográfico de ondas estacionárias que é capaz, através de um amplo espectro de frequências e polarizações e em estreita interação com todas as estruturas materiais, de transmitir sinais com a velocidade da luz para qualquer lugar no organismo, para ativar ou inibir processos bioquímicos, organizando a matéria e muito mais. As estruturas materiais envolvidas nisso são predestinadas a funcionar como antenas para a absorção e a emissão desses sinais. O campo de laser biológico do organismo se estabiliza exatamente no "limiar do laser", onde pode oscilar entre o modo coerente de operação e o modo incoerente de operação, combinando assim as vantagens de ambos os regimes. (POPP, 2002, p. 4).

Este limite é uma "transição de fase sem equilíbrio" (ou estrutura dissipativa), onde a luz pode mudar a sua ordem de forma espontânea e abrupta. Acima do limiar do laser, no regime coerente, o campo de fótons muda para um padrão de

interferência estável e altamente ordenado, no qual as ondas se sobrepõem coerentemente. As várias fontes de luz assumem um comportamento coordenado, funcionando como totalidade.

Ao mesmo tempo, essas ondas são amplificadas autocataliticamente e se transformam em um leve laser. Abaixo do limiar, no regime caótico, as fontes de luz se desacoplam e funcionam separadamente. Dentro desta perspectiva, ambos processos são importantes para o organismo (POPP, 2002).

Já existem evidências da existência de uma nova classe de fenômenos quânticos em sistemas biológicos, investigados por disciplinas avançadas tais como: óptica quântica, eletrodinâmica, eletrodinâmica quântica de cavidades e luz não clássica.

Muitos dos fenômenos estudados pela biologia quântica não podem ser entendidos pela física clássica. Para que haja um bom entendimento dos fenômenos ópticos não lineares de sistemas biológicos é importante lembrar que as distâncias intermoleculares são pequenas em comparação ao comprimento de onda da luz.

Nessas condições, a teoria de Dicke (1954) deve ser aplicada na compreensão da interação da luz com a matéria. Segundo o pesquisador, a reemissão espontânea da luz absorvida é impossível, devido ao fato da distância intermolecular ser significativamente menor que o comprimento de onda. Ele coloca que,

Em vez disso, a interação das moléculas de pigmento e os fótons se dividem em dois novos "regimes" de super e sub-radiância. Super-radiância corresponde à interferência construtiva de ondas de luz se acumulando em "flashes" de luz coerente que são então emitidos em intervalos de tempo relativamente curtos. Sub-radiância é definida como interferência destrutiva das ondas de luz dentro do sistema de moléculas absorventes. (DICKE, 1954, p. 108).

O modelo desenvolvido por Dicke utiliza equações diferenciais não lineares que determinam a evolução semiclássica do sistema. Sob certas condições, interações entre átomos e luz, confinada em cavidades ópticas, pode exibir uma transição de fase quântica para um estado no qual os átomos emitem superradiância.

Dicke apontou, portanto, que grupos de moléculas podem atuar como sistemas de antenas com emissão coerente, quando suas distâncias são menores que o

comprimento de onda da radiação emitida. Os estudos e pesquisas de Dicke contribuíram para o surgimento de um novo campo dentro da física moderna: a Eletrodinâmica Quântica de Cavidades.

#### 2.1.4.3 *Microtúbulos e Eletrodinâmica Quântica de Cavidades*

O entendimento da formação de cavidades eletromagnéticas na matéria viva parece ser um fator essencial para elucidar a dinâmica de interação biomolecular em física moderna.

Segundo Gomez (2014),

O estudo da interação radiação - matéria mudou quando Dirac e Fermi associaram cada modo do campo da radiação com um oscilador harmônico quantizado, sendo isto fundamental para a teoria quântica da radiação. A quantização do campo de radiação forneceu as explicações dos fenômenos: emissão espontânea, efeito fotoelétrico e o deslocamento de Lamb, entre outros. Conseqüentemente, os estudos da interação átomo-campo iniciam-se neste novo contexto, onde utiliza-se o campo e o átomo quantizados, diferentemente da teoria semiclássica de interação átomo-campo, onde o campo é tratado classicamente e o átomo quanticamente. O resultado deste novo sistema quântico dá origem à eletrodinâmica quântica de cavidades (EQC), a qual pode ser definida, como a física da interação entre um spin e um oscilador. (GOMEZ, 2014, p. 38).

A Eletrodinâmica Quântica de Cavidade também pode ser definida como o estudo da interação entre a luz confinada em uma cavidade reflexiva com átomos ou outras partículas. Isso em condições onde a natureza quântica dos fótons é bastante significativa (WIKIPÉDIA, 2021). Esse conhecimento é de vital importância para a computação quântica.

Os computadores quânticos são dispositivos que usam coerência quântica para processar informações, o que não pode ser realizado pelos computadores clássicos. Métodos específicos para realizar uma computação quântica são chamados algoritmos quânticos.

Muitos sistemas vivos utilizam algoritmos quânticos, por exemplo, a coerência demonstrada no transporte excitônico (já citado anteriormente) indica que as bactérias trabalham com algoritmos quânticos conhecidos como *quantum search*.

Recentes estudos indicam que os microtúbulos podem ser considerados um sistema eletrodinâmico quântico de cavidades. Isso significa que eles podem ser vistos como cavidades ópticas com propriedades quânticas.

Os microtúbulos são polímeros longos e relativamente rígidos, com forma cilíndrica e oca (de 25 nm de diâmetro) e cujo comprimento pode alcançar mais de 20 µm. A polimerização de duas moléculas de proteínas globulares chamadas alfa e beta tubulinas formam os microtúbulos, tendo como o ponto de partida os dímeros de tubulina.

Eles possuem extremidades positiva e negativa, devido às suas extremidades serem diferentes (formadas pelos dímeros). A composição específica da tubulina também fortaleceu os modelos quânticos de processamento neural, pelo fato de ser parcialmente composta por cromóforos como o triptofano, dispostos de forma semelhante aos sistemas fotossintéticos de plantas e bactérias.

Os microtúbulos, microfilamentos (ou filamentos de actina) e os filamentos intermediários formam uma rede complexa de fibras conhecida como citoesqueleto.

Pesquisas envolvendo modelagens matemáticas encontraram equações capazes de estimar as frequências envolvidas nesses processos biológicos. Isso significa que algumas frequências características podem ser estimadas para ressonadores de cavidade biológica natural. Considerando uma cavidade de comprimento  $L$ , frequência  $w$  e constante dielétrica  $\epsilon$ , a equação que relaciona essas três variáveis é:

$$w = (\pi c / L \cdot \sqrt{\epsilon}) \quad (3.0)$$

A tubulina pode ser vista como um típico sistema mecânico quântico de dois estados, sendo as frequências de luz visível da ordem de THz. No cérebro também já foram detectados biofótons no espectro visível. As frequências de transição em tubulinas são da ordem de THz e a interação entre um sistema de dois estados (tubulina) e um campo quantizado de modo único (biofótons) é dado pelo Hamiltoniano total:

$$H = \hat{H}_t + \hat{H}_b + \hat{H}_i = 1/2 \hbar \omega_0 \hat{\sigma}_t + \hbar \omega \hat{a}^\dagger \hat{a} + \hbar \lambda (\hat{\sigma}_+ \hat{a} + \hat{\sigma}_- \hat{a}^\dagger) \quad (3.1)$$

Onde  $H_t$  é o operador Hamiltoniano para a tubulina,  $H_b$  é o operador Hamiltoniano para o biofóton,  $H_i$  é o operador que representa a interação entre ambos,  $\omega_0$  é a frequência de transição da tubulina e  $\omega$  é a frequência dos biofótons. As variáveis  $\hat{a}$  e  $\hat{a}^\dagger$  representam os operadores de aniquilação e de criação:

$$\hat{a}|n\rangle = \sqrt{n}|n-1\rangle \quad (3.2)$$

$$\hat{a}^\dagger|n\rangle = \sqrt{n+1}|n+1\rangle \quad (3.3)$$

O ket  $|n\rangle$  é o número de estado de fótons. Na Hamiltoniana (3.1), a quantidade  $\lambda$  é definida como:

$$\lambda = dg/\hbar \quad (3.4)$$

Sendo  $d$  o momento do dipolo da tubulina,  $\hbar = h/2\pi$ , onde  $h$  é a constante de Planck. O valor de  $g$  é obtido através da equação:

$$g = 1/2 \sqrt{\hbar\omega/\epsilon V} \quad (3.5)$$

Onde  $\epsilon$  é a constante dielétrica do ambiente e  $\epsilon/\epsilon_0 = 80$ . A variável  $\epsilon_0$  é a constante dielétrica do vácuo e  $V$  é o volume. O vetor de estado da tubulina é dado pela seguinte equação:

$$|\text{tubulina}\rangle = C_g(t) |g\rangle + C_e(t) |e\rangle \quad (3.6)$$

Onde  $C_g(t)$  e  $C_e(t)$  são os coeficientes dependentes do tempo, no qual  $t$  representa o tempo. O estado do campo é dado pela equação:

$$|\text{biofótons}\rangle = \sum_0^\infty C_n |n\rangle \quad (3.7)$$

Onde  $C_n$  é uma constante e  $|n\rangle$  é o número de estado dos fótons. O estado total é o tensor:

$$|\Psi(t)\rangle = |\text{tubulina}\rangle \otimes |\text{biofótons}\rangle \quad (3.8)$$

Inserindo o estado total na equação de Schrödinger:

$$i\hbar \frac{d}{dt} |\Psi(t)\rangle = \hat{H}_i |\Psi(t)\rangle \quad (3.9)$$

Obtém-se a função de onda dependente do tempo:

$$|\Psi(t)\rangle = \sum_0^\infty \{ [c_e c_n \cos(\lambda t \sqrt{n+1}) - i c_g c_{n+1} \sin(\lambda t \sqrt{n+1})] |e\rangle |n\rangle + [-i c_e c_{n-1} \sin(\lambda t \sqrt{n}) + i c_g c_n \cos(\lambda t \sqrt{n})] |g\rangle |n\rangle \}$$

Os microtúbulos, portanto, possuem características apropriadas para a produção de processos quânticos. O arranjo de sua estrutura é similar à do cristal, tendo um núcleo interior oco e sendo capaz de organizar a função celular. Isso devido à sua habilidade no processamento de informação.

## 2.2 Metodologia

Esse trabalho teórico, realizado dentro de uma abordagem de caráter qualitativo, teve como objetivo fazer uma revisão bibliográfica utilizando-se de sites de periódicos científicos, livros, teses, artigos, revistas, monografias e dissertações relacionadas à biologia quântica. O critério utilizado para a escolha das obras consultadas foi o da aplicação dos conceitos da mecânica quântica no entendimento de alguns processos biológicos.

As informações obtidas neste projeto de pesquisa fazem parte de uma nova abordagem científica conhecida como biologia quântica, sendo que todo o material teórico coletado e apresentado neste artigo, teve a sua origem em sites, teses, artigos e revistas especializadas nessa disciplina. Esta pesquisa bibliográfica foi realizada de forma virtual (através do uso da internet) e através de livros adquiridos. Pela via virtual foram acessados: o *Research Gate* e *Academia.edu* (redes sociais para pesquisadores) e sites acadêmicos como: *SciELO*, *Google Acadêmico*, *Elsevier*, *Wikipédia* e *PubMed*.

## 3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Todos esses estudos e pesquisas indicam que a compreensão dos fenômenos biológicos necessita de um novo saber, que seja capaz de integrar os conhecimentos, tanto da biologia, quanto da física, principalmente da biologia molecular com a mecânica quântica.

Os ganhos desta integração poderão ser muitos, pois essas descobertas sugerem aplicações práticas. Uma melhor compreensão de como os sistemas

biológicos alcançam a coerência quântica, em condições ambientais, mudará o pensamento sobre projetos de estruturas de absorção da luz. Isso irá permitir que os cientistas construam tecnologias com células solares com melhores eficiências de conversão de energia. Atualmente também é reconhecido que a biologia quântica tem muito para contribuir no que diz respeito ao desenvolvimento de tecnologias de energia sustentável e engenharia de sistemas fotônicos.

A descoberta sobre o papel positivo do ruído ambiental poderá ter significativa importância para a engenharia, pois os usos de materiais como pontos quânticos (cristais de nano-escala) ou altamente ramificados e, cravejados com grupos químicos de absorção de luz, poderão servir como matrizes de antena artificial de polímeros.

A coerência quântica, por exemplo, permite que o fotossistema realize computação quântica do “melhor caminho” para os elétrons. Pesquisadores que se interessam em projetos de sistemas de materiais, para computação quântica e tecnologia da informação, reconhecem que o estudo do fenômeno da bússola aviária (de temperatura ambiente) também poderá ser muito útil.

A descoberta de como a bússola do pássaro se protege da decoerência poderá dar algumas pistas para a criação de tecnologias quânticas.

O encontro da biologia com a física quântica poderá trazer muitas respostas para grandes enigmas relacionados ao micro e macrocosmos. A realidade dos processos quânticos em sistemas biológicos oferece um projeto unificador para explicar muitos fenômenos que atualmente desafiam a visão biomédica dominante da vida, baseada no reducionismo molecular.

## REFERÊNCIAS

ADAMS, Betony. Quantum effects in the brain: A review. **AVS Quantum Science**, New York, v. 2, p. 42, 1 April 2020.

BALL, Philip. Physics of life: The dawn of quantum biology. **Nature**, London, v. 474, n. 16, p. 272-274, 15 June 2011.

BISCHOF, Marco. Biophotons: the light in our cells. **Journal of Optometric Phototherapy**, p. 6, March. 2005.

DICKE, Robert. Coherence in spontaneous radiation processes. **Physical Review**, v. 93, p. 99-100, 1 January 1954.

FLEMING, Graham; SCHOLLES, Gregory; CHENG, Yang. Quantum effects in biology. **Procedia Chemistry**, v. 3, p. 38-57, December 2011. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/241122951\\_Quantum\\_effects\\_in\\_biology](https://www.researchgate.net/publication/241122951_Quantum_effects_in_biology). Acesso em: 9 mar. 2021.

GAUGER, Erik *et al.* Sustained quantum coherence and entanglement in the avian compass. **Physical Review Letter**, v. 106, n. 4, p. 5, 21 January 2011.

GOMEZ, Eliceo. **Simulação da equação de Dirac em eletrodinâmica quântica de cavidades**. São Carlos, v. 1, 2013. 62 p. Dissertação (Física) - Universidade de São Paulo, Instituto de Física de São Carlos, 2014.

HISCOCK, Hamish *et al.* The quantum needle of the avian magnetic compass. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 113, n. 17, p. 1-6, 4 April 2016.

HISCOCK, Hamish *et al.* The quantum needle of the avian magnetic compass. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 113, n. 17, p. 1-6, 4 April 2016. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/224954062\\_Hydrogen\\_Tunneling\\_in\\_Enzyme\\_Reactions](https://www.researchgate.net/publication/224954062_Hydrogen_Tunneling_in_Enzyme_Reactions). Acesso em: 9 mar. 2021.

LAMBERT, Neill *et al.* Quantum Biology. **Nature Physics**, v. 9, p. 10-18, 9 December 2012.

LLOYD, Seth. Quantum coherence in biological systems. *In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM NANOSCIENCE AND QUANTUM PHYSICS*, 302. 2011. **Anais [...] Journal of Physics: Conference Series: IOP Publishing Ltd**, 2011. 1-5 p.

MAJUMDAR, RABI. **QUANTUM MECHANICS IN PHYSICS AND CHEMISTRY WITH APPLICATIONS TO BIOLOGY**. 2. ed. Delhi: PHI Learning Pvt. Ltd., f. 214, 2015. 428 p.

MARAI, Adriana *et al.* The future of quantum biology. **Journal of Real Society Interface**, p. 1-14, November 2018. Biophysics.

MARLETTO, Chiara. Entanglement between living bacteria and quantized light witnessed by Rabi splitting. **Journal of Physics Communications**, p. 6, 10 October. 2018. Quantum Physics.

MOHSENI, Masoud *et al.* Environment-assisted quantum walks in photosynthetic energy transfer. **The Journal of Chemical Physics**, v. 129, n. 17, p. 1-9, 6 November 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.3002335>. Acesso em: 9 mar. 2021.

NUSSENZVEIG, Herch. Bohr's 'Light and Life' revisited. **Physica Scripta**, v. 90, n. 11, p. 11, November 2015.

POPP, Fritz-Albert. About the coherence of biophotons. *In: MACROSCOPIC QUANTUM COHERENCE*. 1999. **Anais [...]**. Boston University and MIT, 1999. 12 p.

RAHNAMA, Majid; TUSZYNSKI, Jack; BÓKKON, István. Emission of mitochondrial biophotons and their effect on electrical activity of membrane via microtubules. **Journal of Integrative Neuroscience**, v. 10, n. 1, p. 65-88, February 2011.

RITZ, Thorsten. Quantum effects in biology: Bird navigation. **Chemistry Procedia**, v. 3, n. 1, p. 262-275, 2011. Disponível em: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com). Acesso em: 9 mar. 2021.

SHI, Siyuan; KUMAR, Prem; LEE, Kim. Generation of photonic entanglement in green fluorescent proteins. **Nature Communications**, v. 8, p. 1-7, 5 December 2017.

SHRÖDINGER, Erwin. **O que é a vida?**. 1. ed. São Paulo: FEU, 1992. 172 p.

STITELY, Kevin; GIRALDO, Andrus; KRAUSKOPF, Bernd. Nonlinear semiclassical dynamics of the unbalanced, open Dicke model. **Physical Review Research**, v. 2, 23 July 2020.

SWAIN, John. **On the possibility of large upconversions and mode coupling between Frohlich states and visible photons in biological systems**. Research Gate. eprint arXiv:physics/0603137, 2006. 5 p. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/2175396>. Acesso em: 9 mar. 2021.

TONELLO, Lúcio; COCCHI, Massimo; GRABIELLI, Fabio. On the possible quantum role of serotonin in consciousness. **Journal of Integrative Neuroscience**. PubMed, p. 295-308, 9 July. 2015. Mind and Consciousness models.

TUFAILE, Alberto. *Biologia Quântica*. In: VII SEMANA ACADÊMICA DE LICENCIATURA EM CIÊNCIAS DA NATUREZA. 2019. **Anais [...]** Universidade de São Paulo, 2019. Disponível em: DOI: 10.13140/RG.2.2.24337.79209. Acesso em: 9 mar. 2021.

WEINGARTEN, Carol; FISHER, Matthew. New spin on neural processing: quantum cognition. **Frontiers in Human Neuroscience**, v. 10, n. 541, p. 1-, 26 October 2016.