

## PONTOS QUÂNTICOS APLICADOS NA ÁREA DA SAÚDE – CBEB 2024

 <https://doi.org/10.56238/sevened2024.037-152>

**M. V. Araujo Vieira**

Seção Nuclear (PPGEN) - Instituto Militar de Engenharia, 22290-270, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil  
E-mail: marcus.vinicius@ime.eb.br

**G. S. Pereira**

Seção Nuclear (PPGEN) - Instituto Militar de Engenharia, 22290-270, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil

**F. M. Garbim**

Seção Nuclear (PPGEN) - Instituto Militar de Engenharia, 22290-270, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil

**F. M. Araujo-Moreira**

Seção Nuclear (PPGEN) - Instituto Militar de Engenharia, 22290-270, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil

---

### RESUMO

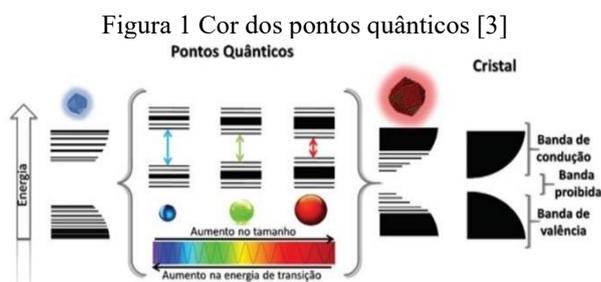
Este artigo aborda as aplicações dos pontos quânticos na área da saúde, com foco nas aplicações dos pontos de grafeno e carbono. Também apresenta a explicação do que são pontos quânticos e a motivação para o uso dessa tecnologia na saúde. Para essa abordagem, foram realizadas pesquisas com diversos autores, a fim de apresentar ao leitor a importância de maiores estudos dessa nanotecnologia para que futuramente ela possa ser aplicada na rede de saúde. Cabe ressaltar que apenas uma parcela dos estudos já publicados sobre pontos quânticos e a área da saúde foi abordada.

**Palavras-chave:** Pontos quânticos de grafeno. Pontos quânticos de carbono. Saúde.

## 1 INTRODUÇÃO

Em meados de 1937 o físico francês Herbert Frohlich discutia a existência de nanopartículas que hoje são conhecidas como pontos quânticos, na época a discussão nada mais era do que pressupostos teóricos. Anos depois, três cientistas provam que o que foi tratado como uma suposição era na verdade concreto e foi chamado de pontos quânticos. Por causa desses estudos, o trio de cientistas recebeu o Prêmio Nobel de Química de 2023 [1]. Embora o desenvolvimento mais impactante dos pontos quânticos seja alcançado após o Prêmio Nobel, a fascinante evolução dessa área de estudo que correlaciona as ciências físicas, químicas e biológicas começa, como mencionado anteriormente, em meados da década de 1980 sobre os efeitos do tamanho quântico em nanopartículas coloidais. Na década de 2000, avanços notáveis incluíram a síntese de Ekimov de pontos quânticos em semicondutores em uma matriz de vidro, bem como o desenvolvimento de métodos de síntese ideais para pontos quânticos com tamanho e resolução bem definidos. Em meados daquela década, os pontos quantitativos mostraram-se promissores em imagens biomédicas, com melhorias significativas no brilho, estabilidade e propriedades ajustáveis, bem como o desenvolvimento de pontos biocompatíveis. Por volta de 2010, essa pesquisa marcou uma era de avanços notáveis em aplicações de pontos quânticos, desde a integração em telas de LED para melhorar a precisão das cores e a eficiência energética até seu uso em eletrônicos, como smartphones, tablets, monitores e TVs. Na década seguinte, em 2020, registou-se um aumento substancial da utilização de pontos quânticos em energias renováveis, como células solares mais eficientes e maior captura e conversão de energia, bem como em áreas como catálise, nanomedicina e comunicação de alta velocidade, destacando o seu potencial inovador em várias ciências e tecnologias [2]. Os pontos quânticos (QD) são considerados as armadilhas de um grupo de átomos em um lugar tão pequeno que força uma mudança na posição dos respectivos elétrons. Com isso, entende-se que os átomos estão alocados em pequenos lugares, onde os elétrons estão de acordo com seu nível de energia. Quando esse espaço é movido e o ponto quântico é alocado, há então uma separação dos níveis de energia e, conseqüentemente, há uma mudança nesses níveis. Nesse processo de mudança de posição, quando há mudanças eletrônicas nos níveis de energia, os elétrons emitem um fóton de uma frequência específica, e essa emissão gera uma coloração e essa é uma das propriedades que podem ser observadas [1]. Os experimentos realizados pelos cientistas mostraram que as partículas tinham propriedades ópticas diferentes e que o tamanho das partículas influenciava sua coloração, com as partículas maiores absorvendo ondas eletromagnéticas tendendo para o vermelho. Finalmente, os pontos quânticos são pequenos cristais compostos por um certo número de átomos confinados em uma região [1]. Considera-se que os pontos quânticos são materiais excepcionais devido às suas interessantes propriedades ópticas e eletrônicas, o que confere ao material a capacidade de aplicação tecnológica em diversas áreas. Esses materiais são dotados de capacidades que os tornam semicondutores nanocristalinos, são constituídos por vários átomos e possuem

portadores de carga, sendo esses carregadores os elétrons e buracos que são as cargas positivas [3]. Outro termo utilizado e de grande importância é o de confinamento quântico, que nada mais é do que o tamanho físico desse material estando abaixo do raio de Bohr do éxciton, o raio de Bohr é entendido como a distância média entre o elétron e a carga positiva. O que foi analisado na pesquisa é que quanto menor o tamanho do material, maior o confinamento dos portadores de carga e, portanto, uma energia maior está na banda proibida, como pode ser visto na figura 1.

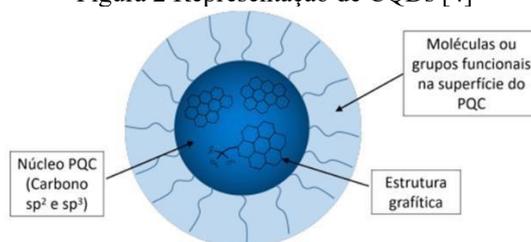


Como pode ser visto na figura 1, o tamanho é inversamente proporcional à quantidade de energia, e o mesmo composto químico pode produzir cores diferentes, sendo necessário apenas alterar o tamanho dos nanocristais. Sabe-se atualmente que os pontos têm medidas de 1 nanômetro (nm) a 10 nanômetros (nm) [3]. O QD pode ser manipulado através de vários elementos dos grupos químicos II-VI, a saber: CdSe, CdTe, CdS, ZnSe, ZnO, entre outros) ou grupos III-V como InP e InAs. Deve-se notar que ao manusear Cd e Pb, há dificuldade de aplicação devido à toxicidade dos materiais manicizados. Por outro lado, os compostos químicos dos grupos II-III-VI não apresentam toxicidade, tornando esses compostos mais atraentes para uso [3]

### 1.1 PONTOS QUÂNTICOS DE CARBONO

Em 2004, durante a manipulação de nanotubos de carbono para realizar um processo de purificação, o ponto quântico de carbono foi obtido acidentalmente. Este material é baseado em carbono, tem fotoluminescência, características quase esféricas e tem uma dimensão zero [4]. Desde a sua descoberta, inúmeras pesquisas foram realizadas, e a partir delas observou-se que este material é dotado de vantagens, tais como: Baixa toxicidade, estável, é considerado de baixo custo e abundante [4]. Os pontos quânticos de carbono (CQDs) são hidrofílicos devido à presença de grupos funcionais amino, carboxila e hidroxila. De acordo com a figura 2, a representação do ponto PQC pode ser vista.

Figura 2 Representação de CQDs [4]



Para o mecanismo de fotoluminescência ainda existem dúvidas sobre seu funcionamento, e por isso não há explicação sinerosa. Entre essas explicações estão o fator de grupos de superfície, tamanho e até mesmo a presença de moléculas fluorescentes, de modo que nota-se que não há apenas uma compreensão comum dessa questão, mas várias explicações. Por ser um ponto quântico, em geral, pode-se entender que a fluirescência vem de excitações eletrônicas e troca de seu estado fundamental.

## 1.2 PONTOS QUÂNTICOS DE GRAFENO

O grafeno é um material que é a forma alotrópica do carbono, e sua estrutura é bidimensional e sua espessura é a de um único átomo. Este material é considerado de grande valor, devido às suas propriedades térmicas, eletrônicas, mecânicas e também por sua estabilidade química. Observa-se que se quando uma porção de grafeno é pequena o suficiente para estar sob a influência do efeito de confinamento quântico, então ele se torna um semicondutor e, portanto, exibirá propriedades especiais [5]. Os pontos quânticos de grafeno (GQDs) são folhas com dimensões nanométricas isoladas de grafeno, essas dimensões têm um tamanho menor que 100 nanômetros (nm), e devido ao seu confinamento quantum geram intensa fotoluminescência, além do confinamento a fotoluminescência é gerada devido a efeitos de borda. Eles fazem parte do grupo de nanomateriais de grafeno [6]. Os GQDs têm baixa toxicidade, suas dispersões têm estabilidade quando na água, pois sua estrutura forma interações hidrofóbicas, têm interação rápida com espécies químicas, suas propriedades ópticas têm maior estabilidade e, finalmente, têm maior sensibilidade a respostas analíticas, todas essas vantagens apresentadas estão relacionadas quando comparadas aos pontos quânticos semicondutores [6]. Neste elemento, observa-se que alguns fatores podem influenciar a fo-luminescência do material, tais como: defeitos estruturais, presença de grupos contendo oxigênio e por fim os elementos de dopagem geraram influência na luminescência, vale ressaltar que existem dúvidas sobre a precisão do mecanismo de fotoluminescência dos GQDs, e por causa disso várias teorias foram geradas [5]. Esses GQDs podem ter uma variedade de cores que variam de ultravioleta, azul e vermelho. Essas bandas de coloração podem ser observadas ao interagir com a luz ultravioleta (UV). Existem diferentes maneiras de preparar e sintetizar este material, mas a citação não é necessária devido ao fato de que não é o escopo deste trabalho [5]. Alguns estudos têm demonstrado que esse material tem a possibilidade de transportar fármacos, bem como devido ao seu tamanho acredita-se que teria fácil penetração na

camada lipídica e, portanto, não geraria danos, facilitando assim o transporte de fármacos [7]. Assim, nota-se que os pontos quânticos são nanomateriais de grandes aplicações e que podem promover um impacto significativo em diversas áreas, incluindo a área da saúde. Seu impacto na saúde é amplo e será analisado em discussões posteriores, além de esse material ter vantagens econômicas, o que é positivo para o sistema de saúde.

### 1.3 MERCADO

O crescimento do mercado de pontos quânticos previsto de 2024 a 2029 está detalhado no relatório disponibilizado pela Mordor's Intelligence (<https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/quantum-dots-market-industry>), um site técnico para informações sobre crescimento industrial e investimento, neste documento são considerados vários cenários para as aplicações de pontos, nos quais são mencionadas possíveis aplicações biomédicas. O mercado como complexo detém atualmente cerca de 5 bilhões de dólares, concentrando o maior investimento e expansão nas regiões da Ásia e Oceania, conforme mostrado na figura 3.



No entanto, o relatório destaca as aplicações quânticas relacionadas a melhorias de imagem, e suas implementações no mercado, além de suas aplicações probabilísticas como biossensores e detectores de patogenicidade, mas não corrobora para as aplicações relacionadas a fármacos e tratamento devido aos efeitos de toxicidade dos compostos, que ainda possuem um estado experimental e investigativo.

### 1.4 APLICAÇÕES BIOLÓGICAS DE PONTOS QUÂNTICOS

Os CQDs são mais relevantes para aplicações biológicas devido à sua relação orgânica baseada no elemento carbono, que não apenas compõe estruturas moleculares, mas também está intrinsecamente relacionado a estruturas biológicas, como peptídeos, células e tecidos. As células são estruturas complexas compostas por vários mecanismos, que desempenham as mais diversas e complexas funções, desde a absorção de água, até a sua representação para renovação tecidual ou

defesa contra organismos invasores. Por possuírem as mais diversas diferenciações nos organismos, podem ser identificadas por meio de marcadores mais precisos, ou seja, se são feitas de materiais mais permeáveis ou até mais compatíveis com o meio ambiente. A relação dos pontos quânticos como biomarcadores é evidenciada devido à capacidade de excitação de fornecer sinais como fotoluminescência, possibilitando a localização de mutações (carcinomas) e/ou desajustes metabólicos. Por outro lado, os tratamentos estão relacionados à capacidade de ajudar as estruturas biológicas a realizar a defesa ou reestruturação de suas atividades metabólicas de forma coerente após invasões, sejam por microrganismos, acidentes mecânicos ou outros. Assim, as terapias-alvo buscam relacionar os pontos de vários materiais, incluindo o carbono, com a menor toxicidade possível para a formulação e ativação de fármacos, promovendo assim sua dispersão ou absorção apenas pelos órgãos, tecidos ou áreas de interesse para o tratamento definido. Para que ocorram tratamentos menos invasivos e mais eficazes, as ciências da saúde buscam, ao longo dos anos, pesquisar materiais e práticas mais assertivas. Para o qual são necessários exames mais detalhados, que vão desde a funcionalidade geral de um órgão, as técnicas biológicas, até as reproduções realizadas gradual e continuamente por essas estruturas. Conseqüentemente, o maior destaque e expansão de mercado são aqueles relacionados à resolução de imagens por meio de quatum dots e suas emissões de luz, possibilitando a visualização das áreas onde ocorrem os distúrbios, de modo que sua estrutura nanométrica facilita a identificação de reações e atividades relacionadas a patogenicidades.

## 2 MÉTODOS

Para entender a vastidão dos pontos quânticos e suas aplicações nas ciências biomédicas, foi adotada uma metodologia multifacetada composta por várias etapas. Primeiro, foi realizada uma revisão completa da literatura científica relacionada aos pontos quânticos. Esta revisão abrangeu desde os primórdios teóricos discutidos por Herbert Frohlich até as descobertas e aplicações mais recentes, que são apresentadas em artigos. Uma variedade de fontes, incluindo artigos, relatórios técnicos e outras publicações relevantes, foram consultadas para obter uma compreensão abrangente do desenvolvimento e evolução dessa área de estudo. Além disso, estudos anteriores conduzidos por cientistas renomados como Ekimov e Bawendi foram analisados e, em seguida, buscaram entender os avanços e descobertas que contribuíram para o conhecimento atual sobre pontos quânticos. Essa análise nos permitiu identificar as propriedades distintivas dos pontos quânticos, especialmente os pontos de carbono. A coleta de dados desempenhou um papel fundamental em nossa metodologia. Foram reunidas informações relevantes sobre aplicações em diferentes setores e tendências de mercado, com maior foco nas áreas da saúde. As considerações éticas e de segurança foram cuidadosamente ponderadas ao longo de nossa pesquisa, especialmente no que diz respeito ao uso de pontos quânticos na engenharia biomédica. Foram discutidos os desafios e preocupações éticas

relacionados ao uso de materiais nanotecnológicos em aplicações biomédicas e terapêuticas, de acordo com as convenções internacionais sobre bioética e bem-estar animal. Por fim, foi realizada uma análise abrangente do mercado, examinando as tendências de crescimento, áreas de aplicação destacadas e considerações econômicas e comerciais relacionadas aos pontos quânticos. Essa metodologia permitiu uma análise detalhada e abrangente dos pontos quânticos, desde suas bases teóricas até suas aplicações práticas, considerando aspectos éticos, de segurança e de mercado. Os resultados e discussões obtidos forneceram informações valiosas sobre o potencial desses materiais em diversas áreas, incluindo saúde e tecnologia.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os pontos quânticos têm várias aplicações, bem como certas vantagens já mencionadas anteriormente neste artigo. Faz-se necessário, portanto, citar pesquisas que abordem o uso desses materiais na área da saúde, vale ressaltar que os trabalhos aqui citados são apenas uma amostra do potencial desse material, não representando, portanto, todos os estudos já realizados. Alguns autores apresentam que os CQDs foram aplicados em bioimagem, pontos quânticos foram preparados e após a preparação foram marcadas células cancerígenas da região da mama humana, e células epiteliais humanas foram utilizadas como controles. Ele então excitou as células até um certo comprimento, e com essa fotoluminescência foi apresentada. Observou-se que esse material é mais biocompatível e que foi 80% maior na retenção celular. Além disso, a retenção celular de pontos quânticos pode ser observada, e essa retenção foi observada usando um microscópio de fluorescência comum. Após testes adicionais, foi confirmado que os CQDs foram internados nas células e que isso foi realizado por endocitose. Conclui-se neste artigo que os CQDs são interessantes devido ao seu baixo custo, possuem caráter não tóxico, demonstrando que não apresentam problemas para aplicações biológicas, demonstrando que seu uso terá grande impacto [8].

Foi feito um trabalho para desenvolver métodos de análise usando pontos quânticos de fibra, e esses pontos quânticos teriam o efeito de uma sonda fotoluminescente com o objetivo de determinar um medicamento para pacientes cardíacos. Os pontos quânticos de grafeno foram produzidos a partir de dispersões aquosas e preparados por pirólise de glutatona e ácido cítrico, essa dispersão gerou GQDs funcionalizados com grupos amino. Além disso, também foram realizadas análises com ou sem a presença ou ausência de  $Fe^{3+}$ . Esses GQDs foram utilizados no estudo como sondas para determinar o uso da medicação, os resultados obtidos foram significativos e com isso observou-se que independentemente da existência ou não de  $Fe^{3+}$ , mas que é possível utilizar essas sondas para medir a medicação. Além disso, observou-se também que essas sondas possuem vantagem competitiva em relação a outras já utilizadas, esse diferencial é o fato de não ser utilizado nenhum reagente tóxico [6].

Em 2018, foi realizado um estudo mais amplo sobre o uso de GQDs como sonda de análise, onde além do uso para observação de medicamentos para 6 pacientes cardíacos, também foi analisado seu uso em histaminas e sulfato de canamicina. Quando na presença de histaminas, o estudo avaliou as reações de espalhamento fotoluminescente. Para o sulfato de canamicina, nanopartículas de ouro foram necessárias para medir o efeito da fotoluminescência associada aos GQDs. O estudo demonstrou que a sonda para uso no fármaco cardíaco analisado teve bons resultados, de modo que a proposta se mostra competitiva quando comparada aos pares já descritos na literatura. Por outro lado, para a sonda de histamina, foram necessários mediadores em sistema aquoso, e com isso foi novamente observada uma boa correlação da sonda com  $Fe^{3+}$  para análise de histamina. Finalmente, na análise da sonda para as concentrações de canamicina, o estudo foi bem-sucedido para a determinação de amostras testadas com febre amarela e para amostras de formulações farmacêuticas. Portanto, é possível observar neste trabalho um bom uso de GQDs para a análise de determinadas substâncias [5]. Em 2019 publicou estudos e análises referentes a ensaios que utilizam pontos quânticos para fins biomédicos, no entanto, apenas foram incluídos estudos *in vitro* e *ex vivo*, devido às dificuldades de aprovação bioética relacionadas à toxicidade de longo prazo associada à sua administração. O estudo reafirma a relevância das aplicações desses métodos para tratamentos mais assertivos e especializados, focados na permeabilidade e afinidade dos tecidos em tratamento, tornando-os uma ferramenta adequada para tratamentos personalizados [9].

Em 2020, foi realizado um estudo utilizando o grafeno quantum dot para o tratamento da leucemia, os pontos quânticos neste caso se encarregariam de carregar os medicamentos quimioterápicos, a fim de reduzir os efeitos tóxicos do tratamento. Neste estudo, a carbodimida foi funcionalizada para que pudesse ser posteriormente conjugada ao fármaco imatinibe. Essa droga foi planejada para ser sintetizada e conjugada aos GQDs, e esse procedimento foi realizado com sucesso pelo estudo. Foi possível observar que esse conjugado foi capaz de induzir a morte de células leucêmicas, e apresentou menor toxicidade para células saudáveis quando comparado ao uso do fármaco Imatinibe isoladamente. Este trabalho foi capaz de demonstrar que os transportadores de medicamentos feitos de nanopartículas de carbono têm sido eficazes no tratamento do câncer. Além disso, são menos tóxicos, o que é positivo para o paciente em tratamento [7].

Além das questões técnicas e científicas, é fundamental considerar as implicações éticas e de segurança associadas aos estudos de Pontos Quânticos em engenharia biomédica. As convenções de bioética relacionadas com os estudos em questão são a Declaração Universal sobre Bioética e Direitos Humanos - UNESCO 2005, Convenção de Oviedo (Convenção para a Proteção dos Direitos Humanos e da Dignidade do Ser Humano no que diz respeito às Aplicações da Biologia e da Medicina): - Conselho da Europa em 1997 e a Declaração de Helsinque, em que se destaca a necessidade de



informar os pacientes sobre os riscos da pesquisa a que estão sendo submetidos, a liberdade em relação à agressividade dos compostos ou atividades a serem realizadas.

Existem também convenções que abrangem o bem-estar e a proteção animal, bem como a viabilidade e autorização de seu uso em pesquisas, algumas das quais são: Convenção Europeia para a Proteção de Animais Vertebrados Usados para Fins Experimentais e Outros Fins Científicos de 1986, Guia para o Cuidado e Uso de Animais de Laboratório, Diretiva 2010/63/UE sobre a Proteção de Animais Usados para Fins Científicos e Princípios dos Três R's. Esses documentos discutem as implicações do bem-estar dos indivíduos para os resultados e preservação da vida em corroboração com o avanço da pesquisa científica, prevendo limites para dor, privação de sono, alimentação, área de habitat e outros tópicos.

#### **4 CONCLUSÕES**

Os pontos quânticos têm se mostrado com uma alta capacidade de uso no ambiente de saúde, além de sua capacidade de exploração ainda ser grande, com isso entende-se que com o tempo esse material terá maior uso na área da saúde do que possui atualmente. Através deste artigo, demonstrou-se que o material é biocompatível, de baixo custo e de ótima aplicabilidade, esses pontos são vantagens que fazem com que esse material tenha grande potencial de uso no sistema de saúde. Como sugestão para trabalhos futuros, observou-se que há necessidade de estudos desse material para aplicação em outros exames cardíacos, uma vez que há um número significativo de indivíduos que são acometidos por cardiopatias, eventualmente utilizando esse material em conjunto com um aparelho de análise de imagens, é possível obter imagens mais claras e bem definidas.

#### **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos o apoio financeiro da Financiadora de Estudos e Projetos (Finep) e o apoio administrativo da Fundação de Amparo à Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação do Exército Brasileiro (FAPEB) e do Instituto Militar de Engenharia (IME).



## REFERÊNCIAS

PESQUISA SOBRE PONTOS QUÂNTICOS LEVA O NOBEL DE QUÍMICA DE 2023. *Jornal da UNESP*, 4 out. 2023. Disponível em: <https://jornal.unesp.br/2023/10/04/pesquisa-sobre-pontos-quanticos-leva-o-nobel-de-quimica-de-2023/#:~:text=Um%20trio%20de%20cientistas%20que>. Acesso em: 15 abr. 2024.

PONTOS QUÂNTICOS VENCERAM O PRÊMIO NOBEL DE QUÍMICA DE 2023. *CAS Insights*, 2023. Disponível em: <https://www.cas.org/pt-br/resources/cas-insights/emerging-science/what-are-most-overlooked-ideas-have-yet-win-nobel>. Acesso em: 24 abr. 2024.

SANTOS, C.; et al. Síntese e caracterização de pontos quânticos ambientalmente amigáveis, um meio simples de exemplificar e explorar aspectos da nanociência e nanotecnologia em cursos de graduação. *Química Nova*, 2020.

ALBUQUERQUE, I. M. B. de. Estudo da fotoluminescência de pontos quânticos de carbono aminofuncionalizados submetidos à tratamento térmico em estado sólido. 18 set. 2020. Repositório UFAL. Disponível em: <[www.repositorio.ufal.br](http://www.repositorio.ufal.br)>.

ALBERTO, C.; et al. Spectroanalytical methods using graphene quantum dots as photoluminescent probes for the determination of analytes of biological and pharmacological interest. 2020. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/35904/35904.PDF>. Acesso em: 24 abr. 2024.

LUÍS DE SOUZA, R.; et al. Desenvolvimento de métodos analíticos utilizando pontos quânticos de grafeno como sonda fotoluminescente para determinação de captopril. 2016. Disponível em: [https://www.puc-rio.br/ensinopesq/ccpg/pibic/relatorio\\_resumo2016/resumos\\_pdf/ctc/QUI/Renan%20Lu%C3%ADs%20de%20Souza%20Silva.pdf](https://www.puc-rio.br/ensinopesq/ccpg/pibic/relatorio_resumo2016/resumos_pdf/ctc/QUI/Renan%20Lu%C3%ADs%20de%20Souza%20Silva.pdf). Acesso em: 24 abr. 2024.

FELIX, D. Ponto quântico de grafeno (Graphene Quantum Dot) decorado com imatinibe para o tratamento da leucemia. 2020. Disponível em: [https://ppgditm.ufrpe.br/sites/default/files/tes-tes-dissertacoes/TESE\\_DANIELE%20FELIX\\_VERS%C3%83O%20FINAL%20DEZEMBRO%202020.pdf](https://ppgditm.ufrpe.br/sites/default/files/tes-tes-dissertacoes/TESE_DANIELE%20FELIX_VERS%C3%83O%20FINAL%20DEZEMBRO%202020.pdf).

MACHADO, C. E.; et al. Carbon quantum dots: Chemical synthesis, properties and applications. *Revista Virtual de Química*, v. 7, n. 4, p. 1306–1346, 2015.

WAGNER, A. M.; et al. Quantum dots in biomedical applications. *Acta Biomaterialia*, v. 94, p. 44–63, 2019.