



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA

SHEYLIANE MARIA ADRIANO PONTES

**PONTOS QUÂNTICOS DE CARBONO INCORPORADOS EM MATRIZ
POLIMÉRICA PARA APLICAÇÃO EM DIODO EMISSOR DE LUZ**

FORTALEZA

2022

SHEYLIANE MARIA ADRIANO PONTES

PONTOS QUÂNTICOS DE CARBONO INCORPORADOS EM MATRIZ POLIMÉRICA
PARA APLICAÇÃO EM DIODO EMISSOR DE LUZ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Química da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Química. Área de concentração: Química.

Orientador: Prof. Dr. Claudenilson da Silva Clemente.

Coorientadora: Dra. Lillian Maria Uchoa Dutra Fechine.

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- P859p Pontes, Sheyliane Maria Adriano.
Pontos quânticos de carbono incorporados em matriz polimérica para aplicação em diodo emissor de luz /
Sheyliane Maria Adriano Pontes. – 2022.
74 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação
em Química, Fortaleza, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Claudenilson da Silva Clemente.
Coorientação: Dra. Lillian Maria Uchoa Dutra Fechine.
1. Nanomateriais. 2. Pontos Quânticos de Carbono. 3. Fotoluminescência. 4. Dispositivos
Optoeletrônicos. 5. Diodo Emissor de Luz Branca. I. Título.

CDD 540

SHEYLIANE MARIA ADRIANO PONTES

PONTOS QUÂNTICOS DE CARBONO INCORPORADOS EM MATRIZ POLIMÉRICA
PARA APLICAÇÃO EM DIODO EMISSOR DE LUZ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Química da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Química. Área de concentração: Química.

Aprovada em: 17/12/2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Claudenilson da Silva Clemente (orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Pierre Basílio Almeida Fachine
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Idalina Maria Moreira de Carvalho
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Francisco Lucivaldo e Luzia
Gorete.

Aos meus irmãos Francisco Einstein, Paulo
Armstrong e Pedro Aldrim.

Ao meu noivo Francisco Thiago.

AGRADECIMENTOS

A Deus por estar sempre comigo, iluminando, protegendo, guiando os meus passos e dando muita fortaleza.

À minha família pelas lições de vida e torcida.

Ao meu noivo Francisco Thiago pelo companheirismo, compreensão, paciência e apoio. Escolhi construir uma vida ao seu lado, e você faz parte desta etapa, amo muito você!

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

Ao Prof. Dr. Claudenilson da Silva Clemente pela excelente orientação, dicas e discussões construtivas e à Dra. Lillian Maria Uchoa Dutra Fachine pelas dicas, conselhos e suporte.

Ao Prof. Dr. Pierre Basílio Almeida Fachine pelo apoio em ceder o laboratório e também pelas colaborações e sugestões.

À banca examinadora pelas contribuições para o enriquecimento do trabalho.

À Letícia, Joelson, Harisson, Denis, Aldenor, Tiago, Eduardo, Emanuel, Alvernes, Fernando e todos os outros integrantes do Grupo de Química de Materiais Avançados (GQMat) pelas sugestões e ajuda. Especialmente, agradeço ao Samuel e à Vivian pelo acompanhamento, discussões, aprendizados e ensinamentos, vocês fazem parte deste trabalho e contribuíram significativamente para a minha construção profissional e pessoal.

Ao GQMat por fornecer todos os equipamentos e materiais necessários para a conclusão deste trabalho e pela equipe maravilhosa.

A todos os meus companheiros de mestrado.

Ao Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas da Universidade Federal do ABC, ao Laboratório de Produtos e Tecnologia em Processos, ao departamento de Física e à Central analítica pelas contribuições com as análises.

À Universidade Federal do Ceará, em especial aos professores que fizeram parte da minha vida acadêmica, transmitindo seus conhecimentos e colaborando para a minha construção pessoal e intelectual.

Enfim, obrigada a todos que de alguma forma contribuíram de modo direto ou indireto para a construção deste processo de formação profissional.

A todos, o meu sincero agradecimento!

“Deus disse: ‘Faça-se a luz!’. E a luz foi feita.
Deus viu que a luz era boa, e separou a luz das
trevas.” (Gn 1, 3s).

RESUMO

O avanço tecnológico mundial impulsiona a busca por dispositivos optoeletrônicos inovadores, e nessa perspectiva, nanomateriais como os Pontos Quânticos de Carbono (PQC) mostram-se promissores para a substituição de Pontos Quânticos (PQ) inorgânicos utilizados em Diodo Emissor de Luz de mostradores digitais. Os PQC possuem propriedades excepcionais como fotoluminescência, biocompatibilidade, versatilidade sintética e estrutural. Assim, este trabalho apresenta a síntese e caracterização de Pontos Quânticos de Carbono Multicolorido (PQCM) incorporados em matriz polimérica para montar um Diodo Emissor de Luz Branca (*WLED*). Para tal fim, foi realizada uma otimização das condições experimentais bem estabelecidas para a obtenção dos PQCM e foram avaliadas suas propriedades ópticas e estruturais. Uma síntese solvotermal usando dimetilformamida, ácido cítrico e ureia a 166 °C e 11 h e 24 min foi selecionada como condições ótimas a partir de dados dos espectros de absorção na região do Ultravioleta-visível (UV-Vis). A fluorescência indicou emissão em toda a região do visível do espectro eletromagnético, sob fonte de excitação de 380 nm e concentração de 0,22 mg mL⁻¹. Verificou-se, ainda, a formação de nanopartículas agregadas e isoladas, com dimensões de 4 a 12 nm e diferentes grupos químicos funcionais em sua estrutura. Os PQCM foram incorporados em matriz polimérica (*PVA*) que resultou em uma qualidade de cor melhor do que um *WLED* comercial, indicado pelo Índice de Renderização de Cor (*CRI*). Depreende-se que os PQCM têm potencial para a incorporação em matriz sólida, bem como a sua aplicação em diodo emissor de luz para o aprimoramento de dispositivos optoeletrônicos.

Palavras-chave: nanomateriais; pontos quânticos de carbono; fotoluminescência; dispositivos optoeletrônicos; diodo emissor de luz branca.

ABSTRACT

The worldwide technological advance drives the search for innovative optoelectronic devices. In this perspective, nanomaterials such as Carbon Quantum Dots (CQD) show promise for replacing inorganic Quantum Dots (QD) used in Light Emitting Diodes of digital displays. The CQD have exceptional properties such as photoluminescence, biocompatibility, synthetic and structural versatility. Thus, this work presents the synthesis and characterization of Multicolor Carbon Quantum Dots (MCQD) incorporated in a polymer matrix to assemble a White Light Emitting Diode (WLED). For this purpose, an optimization of the experimental conditions to obtain MCQD was carried out and its optical and structural properties were evaluated. A solvothermal synthesis using dimethylformamide, citric acid and urea under 166 °C and 11 h and 24 min was selected as optimal conditions from absorption spectral data in the Ultraviolet-visible region. Fluorescence indicated emission throughout the visible region of the electromagnetic spectrum, under excitation source of 380 nm and concentration of 0.22 mg mL⁻¹. It was also verified the formation of aggregated and isolated nanoparticles, with dimensions from 4 to 12 nm and different functional chemical groups in their structure. The MCQD were incorporated in a polymeric matrix (PVA) which resulted in a better color quality than the analyzed commercial WLED, indicated by the Color Rendering Index (CRI). It appears that MCQD have the potential for incorporation in a solid matrix, as well as its application in light emitting diode for the improvement of optoelectronic devices.

Keywords: nanomaterials; carbon quantum dots; photoluminescence; optoelectronic devices; white light emitting diode.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Espectro eletromagnético e amostras de suspensões coloidais contendo diferentes Pontos Quânticos.....	17
Figura 2 –	Representação esquemática da construção e funcionamento de um painel <i>LCD</i>	20
Figura 3 –	Estrutura representativa do expositor de <i>OLED</i>	22
Figura 4 –	Estrutura representativa do expositor de <i>QLED</i>	24
Figura 5 –	Principais tecnologias <i>WLED</i> . (A) Tecnologia <i>RGB</i> . (B) <i>LED</i> azul revestido por semiconductor amarelo. (C) <i>LED</i> ultravioleta revestido por semicondutores fluorescentes vermelho, azul e verde.	26
Figura 6 –	(A) Perfil eletroforético em gel de agarose a 1% sob luz UV de 365 nm da mistura de nanotubos de carbono brutos (lado esquerdo) e de carbono fluorescente (lado direito). (B) Suspensões de diferentes frações de carbono fluorescente em 365 nm. (C) Imagem topográfica da <i>AFM</i> da fração fluorescente laranja. (D) Distribuição da altura das nanopartículas para essa amostra, com base em dados de três imagens e 521 nanopartículas distintas.....	27
Figura 7 –	Classificação dos PC e representação genérica de cada um deles.	28
Figura 8 –	Propriedade fotoluminescente dos PQC em distintos comprimentos de onda de emissão ou <i>gap</i> de energia. (A) Efeito de Confinamento Quântico. (B) Estado da Molécula. (C) Estado de Superfície.....	30
Figura 9 –	Rotas sintéticas partindo de diferentes precursores. (A) 1,3-Diidroxinaftaleno e periodato de potássio (KIO_4) em etanol. (B) Meta, orto e para-fenilenodiamina em etanol.	33
Figura 10 –	Esquema geral de síntese dos PQCM2.....	37
Figura 11 –	Espectros de UV-Vis das 11 sínteses do planejamento experimental.....	42
Figura 12 –	Curvas de contorno das razões entre as Intensidades das bandas de absorção (A) I_{450}/I_{340} e (B) I_{550}/I_{450}	42

Figura 13 – Espectros de absorção, excitação (linhas tracejadas) e emissão (linhas contínuas) da suspensão aquosa de PQCM2 0,01 mg mL ⁻¹ . Inserção: fotos da amostra vista sob luz branca, excitações de 340, 450 e 550 nm, da esquerda para a direita, respectivamente.	43
Figura 14 – Proposta de diagrama parcial de Jablonski para os PQCM2.....	45
Figura 15 – Espectros de Fotoluminescência em formato bidimensional das suspensões de PQCM2 em diferentes concentrações e fontes de excitação. Inserido: amostras sob luz branca. Ao lado: amostras sob fontes de excitação de 550, 450 e 340 nm, respectivamente de cima para baixo.....	46
Figura 16 – Deconvolução do espectro de fotoluminescência dos PQCM2 0,22 mg mL ⁻¹ em excitação de 380 nm. Inserção: suspensão da amostra sob luz branca e fonte de excitação de 380 nm.....	47
Figura 17 – Fonte de excitação de 450 nm com a mudança de pH das suspensões de PQCM2 0,22 mg mL ⁻¹ . (A) Intensidades máximas de emissão em triplicata e (B) espectros de emissão. Inserção: amostras sob luz branca (acima) e luz 434 nm (abaixo).	48
Figura 18 – Intensidades de emissão em relação ao tempo de estoque da suspensão aquosa de PQCM2 0,01 mg mL ⁻¹ em triplicata. Excitações em 340, 450 e 550 nm e emissões em torno de 450, 550 e 600 nm, respectivamente.	49
Figura 19 – Micrografias de Força Atômica dos PQCM2 (A) de fase, (B) de altura e (C) varredura da altura topográfica da micrografia B.	50
Figura 20 – Espectro de FTIR dos PQCM2.....	51
Figura 21 – Espectro Raman dos PQCM2.....	52
Figura 22 – Espectros de XPS dos PQCM2 e suas deconvoluções: (A) varredura, (B) C1s, (C) N1s, (D) O1s.	53
Figura 23 – Esquema geral de aplicação dos PQCM2 incorporados em PVA sob diodo emissor de luz azul e evidência de estrutura proposta para os PQCM em formato quase-esférico e uma das folhas gráficas.	54

Figura 24 – Termogramas (A) ATG e (B) DTG dos filmes PVA e PVA/PQCM2 em diferentes concentrações.	55
Figura 25 – Termogramas DSC dos filmes PVA e PVA/PQCM2 em diferentes concentrações.	57
Figura 26 – Propriedade fotoluminescente dos filmes PVA/PQCM2. Espectros de luminescência (A) do <i>LED</i> azul e dos PVA/PQCM2 excitados por <i>LED</i> azul em diferentes concentrações. Espectros coloridos de luminescência (B) do PVA/PQCM2-WLED (concentração de PVA/PQCM2 0,36%) e (C) do <i>WLED</i> comercial. (D) Diagrama de cromaticidade do PVA/PQCM2-WLED e do <i>WLED</i> comercial. Inserido: fotografias dos <i>LED</i> de cada espectro mostrado.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Planejamento experimental composto central de base fatorial 2^2 para a produção de PQCM, variação de tempo e temperatura de síntese.	37
Tabela 2 – Bandas de vibração e suas respectivas atribuições para PQCM2.	51
Tabela 3 – Temperatura inicial e perda de massa dos eventos térmicos da análise termogravimétrica dos compósitos PVA/PQCM2.	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>AFM</i>	Microscopia de Força Atômica
<i>APTES</i>	(3-aminopropil)trietoxisilano
<i>ATG</i>	Análise Termogravimétrica
<i>CCT</i>	Temperatura de Cor Correlacionada
<i>CIE</i>	Comissão Internacional de Iluminação
<i>CRI</i>	Índice de Renderização de Cor
<i>CRT</i>	Tubo de Raios Catódicos
<i>DMF</i>	Dimetilformamida
<i>DSC</i>	Calorimetria Exploratória Diferencial
<i>DTG</i>	Derivada da Análise Termogravimétrica
<i>ECQ</i>	Efeito de Confinamento Quântico
<i>EM</i>	Estado da Molécula
<i>ES</i>	Estado de Superfície
<i>FTIR</i>	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier
<i>LaMFA</i>	Laboratório de Materiais Funcionais Avançados
<i>LCD</i>	Expositor de Cristal Líquido
<i>LED</i>	Diodo Emissor de Luz
<i>LPT</i>	Laboratório de Produtos e Tecnologia em Processos
<i>NC</i>	Nanopartículas de Carbono
<i>OLED</i>	Diodo Orgânico Emissor de Luz
<i>PA</i>	Para Análise
<i>PC</i>	Pontos de Carbono
<i>PL</i>	Espectroscopia de Fotoluminescência
<i>PQ</i>	Pontos Quânticos
<i>PQC</i>	Pontos Quânticos de Carbono
<i>PQG</i>	Pontos Quânticos de Grafeno
<i>PQCM</i>	Pontos Quânticos de Carbono Multicolorido
<i>PVA/PQCM2-</i>	Diodo Emissor de Luz Branca de Pontos Quânticos de Carbono
<i>WLED</i>	Multicolorido incorporados em Álcool Polivinílico
<i>PVA</i>	Álcool Polivinílico
<i>QLED</i>	Diodo Emissor de Luz de Pontos Quânticos

<i>RGB</i>	Vermelho-Verde-Azul
<i>RQ</i>	Rendimento Quântico
<i>UFC</i>	Universidade Federal do Ceará
<i>UV-Vis</i>	Espectroscopia na região do Ultravioleta-visível
<i>WLED</i>	Diodo Emissor de Luz Branca
<i>XPS</i>	Espectroscopia de Fotoelétrons excitados por raios X

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	18
2.1	Geral	18
2.2	Específicos	18
3	REVISÃO DE LITERATURA	19
3.1	Mostradores digitais	19
3.1.1	<i>Expositor de cristal líquido</i>	19
3.1.2	<i>Expositor de LED</i>	20
3.1.3	<i>Expositor de OLED</i>	21
3.1.4	<i>Expositor de QLED</i>	23
3.1.5	<i>Diodo Emissor de Luz Branca</i>	25
3.2	Pontos de Carbono	26
3.2.1	<i>Classificação estrutural dos Pontos de Carbono</i>	27
3.2.2	<i>Propriedades físico-químicas dos Pontos Quânticos de Carbono</i>	28
3.2.3	<i>Síntese dos Pontos de Carbono</i>	31
3.2.4	<i>Aplicações dos Pontos Quânticos de Carbono</i>	34
4	METODOLOGIA	36
4.1	Materiais e instrumentação	36
4.2	Síntese de Pontos Quânticos de Carbono Multicolorido (PQCM)	36
4.3	Caracterização dos Pontos Quânticos de Carbono Multicolorido	37
4.3.1	<i>Espectroscopia no Ultravioleta-Visível</i>	37
4.3.2	<i>Espectroscopia de Fotoluminescência</i>	38
4.3.3	<i>Potencial zeta (ζ)</i>	38
4.3.4	<i>Microscopia de Força Atômica</i>	39
4.3.5	<i>Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier</i>	39

4.3.6	<i>Espectroscopia Raman</i>	39
4.3.7	<i>Espectroscopia de Fotoelétrons Excitados por raios X</i>	39
4.4	Incorporação dos Pontos Quânticos de Carbono Multicolorido em matriz polimérica	40
4.4.1	<i>Caracterização das propriedades térmicas dos filmes fotoluminescentes</i>	40
4.4.2	<i>Caracterização da propriedade luminescente do diodo emissor de luz</i>	40
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
5.1	Caracterização dos Pontos Quânticos de Carbono Multicolorido	41
5.2	Caracterização térmica dos compósitos PVA/PQCM2 e luminescente do PVA/PQCM2-WLED	54
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
	REFERÊNCIAS	61

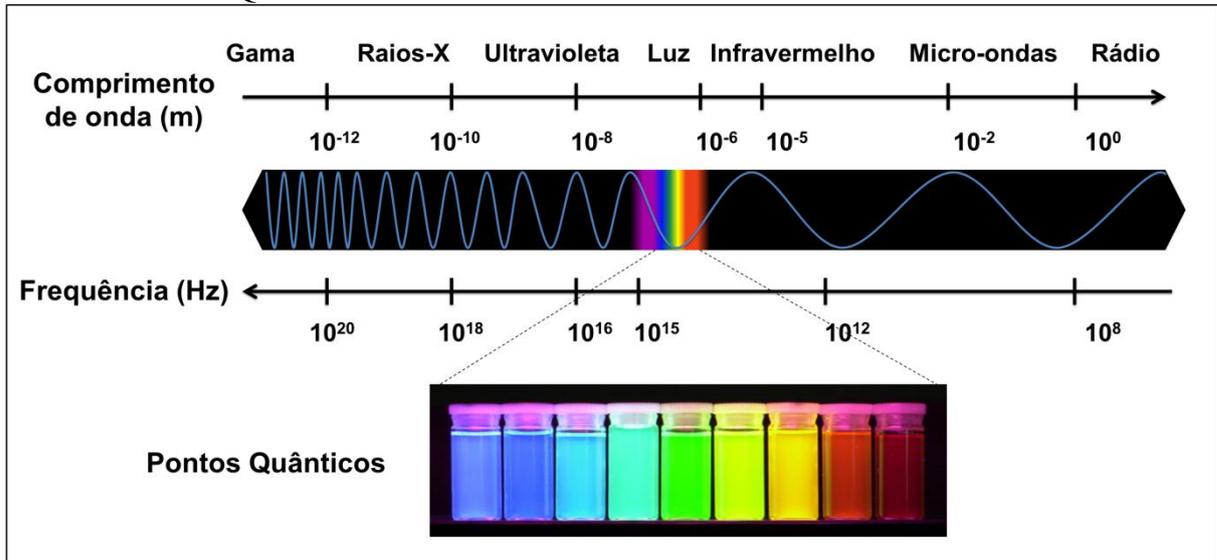
1 INTRODUÇÃO

A evolução tecnológica da sociedade é eminente e almejada por todos os países, dos mais desenvolvidos aos subdesenvolvidos. Dentre os equipamentos tecnológicos muito utilizados no cotidiano, destacam-se os *smartphones*, *notebooks*, *tablets*, televisores e outros. Segundo dados de junho de 2020, no Brasil a taxa de dispositivos digitais em uso por pessoa é de 200% (dois aparelhos por pessoa), no qual esse valor foi quadruplicado em 10 anos (MEIRELLES, 2020). Além disso, a substituição de velhos dispositivos por novos é uma realidade para os próximos anos, em decorrência da atualização e inovação tecnológica.

Tais aparelhos utilizam telas luminosas como interface usuário/dispositivo eletrônico, de modo que o usuário possa visualizar os dados contidos na memória do aparelho de forma simplificada (OHSHIMA, 2014). Há uma grande variedade de telas existentes e diversos estudos voltados para a descoberta de novos materiais que aprimoram a qualidade, brilho e nitidez dos mostradores digitais, na busca de apresentar imagens bem definidas e próximas à realidade. Dentre os tipos de telas empregados atualmente na indústria de televisores, por exemplo, destacam-se as telas de *QLED* (Diodo Emissor de Luz de Pontos Quânticos), as quais apresentam alta qualidade de imagem, brilho e cores, quando comparadas às telas de *LED* (Diodo Emissor de Luz) (HINOV; TSANKOV; IBRISHIMOV, 2019).

Os Pontos Quânticos (PQ) inorgânicos, como seleneto de cádmio (CdSe), fosfeto de índio (InP) e telureto de chumbo (PbTe), são materiais nanocristalinos (com dimensões entre 2 e 20 nm), semicondutores e com propriedades ópticas características. Tais nanomateriais são promissores para aplicação em *LED*, o que origina os *QLED* e permitem um alto valor agregado aos dispositivos optoeletrônicos. Dependendo do tamanho, composição e forma dos nanocristais, os PQ são fotoluminescentes, ou seja, emitem luz em diferentes comprimentos de onda no espectro eletromagnético na região do visível quando excitados por uma radiação eletromagnética não ionizante (fóton) (FIGURA 1) (LV *et al.*, 2020). Entretanto, atualmente, são aplicados em telas *QLED* nanomateriais constituídos por componentes que possuem uma elevada toxicidade (YUAN *et al.*, 2017). Diante disso, é viável a substituição desses nanomateriais por outros com propriedades similares e menos danosos ao meio ambiente (FILALI; PIROT; MIOSSEC, 2020).

Figura 1 – Espectro eletromagnético e amostras de suspensões coloidais contendo diferentes Pontos Quânticos.



Fonte: autora, fotografia inserida de Tomczak e colaboradores (2009).

Os Pontos de Carbono (PC) se encaixam nesses parâmetros, possuindo características fotoluminescentes, nanométricas e de baixa toxicidade (ARCUDI; ĐORĐEVIĆ; PRATO, 2019; GAO *et al.*, 2020a; MA *et al.*, 2020b). Os PC têm sido abordados por muitos pesquisadores com distintas aplicações, como na remediação ambiental (DHENADHAYALAN; LIN; SALEH, 2020), na biomedicina (SHI *et al.*, 2019b), em dispositivos eletrônicos (WANG *et al.*, 2020c) e em outras tecnologias (YANG *et al.*, 2019). Nessa vertente, buscou-se, neste trabalho, contribuir para o estudo dos PC na aplicação em dispositivos optoeletrônicos, a fim de se obter um *LED* com emissão de luz branca, de fácil consecução e de alto padrão de qualidade, quando comparado a um *LED* branco comercial.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Obter Pontos Quânticos de Carbono com emissão em toda a região do visível do espectro eletromagnético, a fim de investigar a fotoluminescência em matriz sólida e utilizá-los na confecção de um diodo emissor de luz branca.

2.2 Específicos

- ❖ Otimizar o processo de produção de Pontos Quânticos de Carbono Multicolorido (PQCM) pelo método solvotermal;
- ❖ Caracterizar os PQCM pelas análises de espectroscopia na região do Ultravioleta-visível (UV-Vis), espectroscopia de Fotoluminescência (*PL*), Microscopia de Força Atômica (*AFM*), espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (*FTIR*), espectroscopia Raman e Espectroscopia de Fotoelétrons excitados por raios X (*XPS*);
- ❖ Imobilizar os PQCM em álcool polivinílico (*PVA*) em diferentes concentrações e verificar as propriedades térmicas e fotoluminescentes dos filmes pela Análise Termogravimétrica (*ATG*), Calorimetria Exploratória Diferencial (*DSC*) e Fotoluminescência (*PL*);
- ❖ Aplicar os filmes fotoluminescentes em diodo emissor de luz azul para obter a luz branca e analisar propriedade óptica em comparação ao *LED* branco comercial.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Mostradores digitais

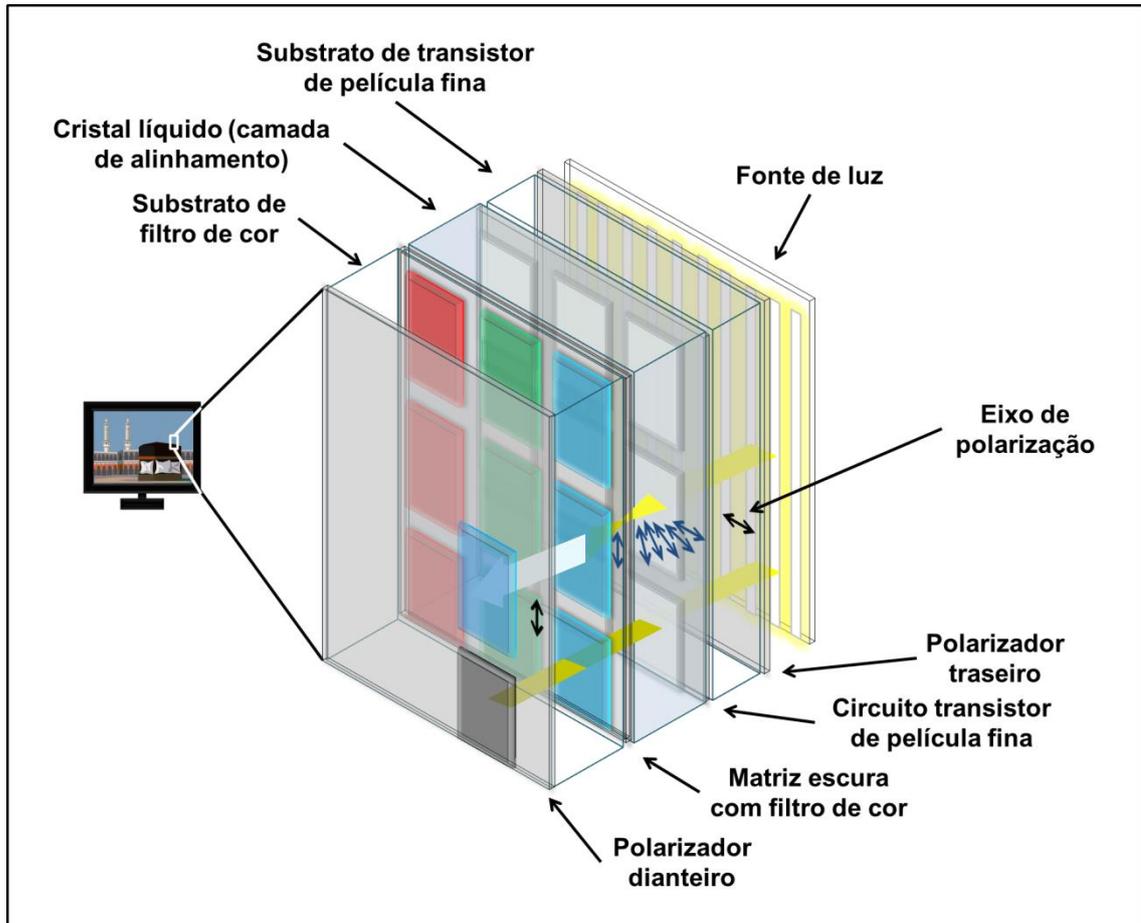
Em 1888, o botânico austríaco Friedrich Reinitzer descobriu o cristal líquido, um material que possui características físicas tanto dos líquidos, como a fluidez, quanto dos sólidos, como a birrefringência (KIM; SONG, 2009). Em um meio birrefringente, uma frente de luz é decomposta em dois índices de refração diferentes (extraordinário e ordinário), os quais são perpendiculares entre si e que podem alterar o estado de polarização da luz (CARLIN *et al.*, 2005). Por outro lado, em 1926, J. L. Baird demonstrou a televisão usando um Tubo de Raios Catódicos (*CRT*), uma forma mais simples e barata de se retratar uma imagem em monitores. Todavia, ainda se almejava a substituição de monitores de *CRT* pelos de tela plana (TANNAS, 1994).

Somente entre os anos 1970 e 1980, emergiu a produção industrial dos Expositores de Cristal Líquido (*LCD*) (KIM; SONG, 2009). Nos últimos anos, a tecnologia *LCD* tornou-se líder de mercado, mas realizam-se esforços voltados para melhorar qualidade, brilho e nitidez de imagem, a fim de se obter uma imagem que se aproxime ainda mais da realidade. Dentre as telas existentes no comércio atual, destacam-se: *LCD*, *LED*, *OLED* (Diodo Orgânico Emissor de Luz), *QLED* e *WLED* (Diodo Emissor de Luz Branca) (HINOV; TSANKOV; IBRISHIMOV, 2019; TONG *et al.*, 2019).

3.1.1 Expositor de cristal líquido

Um tipo de mostrador de cristal líquido (*LCD*) é constituído por uma fina camada de cristal líquido inserido entre dois substratos (de transistor de película fina e de filtro de cor), polarizadores (dianteiro e traseiro) e fonte de luz, esta é geralmente lâmpadas fluorescentes extremamente finas (FIGURA 2). O substrato de transistor de película fina, que direciona o cristal líquido em cada sub-pixel da tela, contém circuitos, eletrodos de pixels e canais. Em contrapartida, o substrato de filtro de cor possui uma matriz escura, um filtro de cores (com os sub-pixels de cores vermelha, azul e verde) e uma camada de eletrodo transparente (KIM; SONG, 2009).

Figura 2 – Representação esquemática da construção e funcionamento de um painel *LCD*.



Fonte: adaptado de Kim e Song (2009).

O cristal líquido modula a formação da imagem através da birrefringência, controlando a polarização da luz e permitindo a passagem ou não de luz dependendo da ausência ou presença de campo elétrico, respectivamente. Na Figura 2, o estado luminoso é transmitido quando as moléculas de cristal líquido trançadas giram a polarização da luz incidente sem um campo elétrico aplicado, alinhando a polarização com o polarizador dianteiro (sub-pixel superior). Para o estado escuro, um campo elétrico é aplicado, a camada de cristal líquido fica destrançada e a polarização da luz fica desalinhada com o polarizador dianteiro (pixel inferior) (KIM; SONG, 2009; OHSHIMA, 2014).

3.1.2 Expositor de LED

Nos últimos anos, a tecnologia do Diodo Emissor de Luz (*LED*) dominou a indústria de iluminação, tanto em dispositivos eletrônicos como em lâmpadas de iluminação ambiente. Comparando com lâmpadas fluorescentes e com outras fontes de luz, o *LED* é

superior em eficiência energética, qualidade da luz e relação custo-benefício. Desse modo, essa lâmpada possui vantagens como: baixo consumo de energia, ampla faixa de temperatura de operação, alto brilho, possibilidade de ajuste do fluxo luminoso e de variação de cores, rápido tempo de resposta, vida útil elevada, ecológica e possibilidade de sua produção em tamanhos pequenos (HINOV; TSANKOV; IBRISHIMOV, 2019; PENG *et al.*, 2016; PENG; ZHANG; LIU, 2017).

As particularidades do *LED* devem-se ao modo de funcionamento desse tipo de lâmpada: uma tensão relativamente baixa é aplicada em uma junção de semicondutores do tipo p-n que gera o efeito eletroluminescente. Os semicondutores são constituídos por elementos metálicos, como Si e Ge, que possuem, em sua estrutura de bandas, banda de valência totalmente preenchida próximo à banda de condução (aproximadamente 2 eV). Em temperaturas mais elevadas, ao ser aplicado um potencial, os elétrons são excitados para a banda de condução. Com o movimento dos elétrons, e consequentemente das vacâncias deixadas por eles na banda de valência, constata-se a condutividade nesses materiais (MIESSLER; FISCHER; TARR, 2014).

Os semicondutores do tipo p-n podem ser cristais elementares puros dopados com outros elementos (com menos ou mais elétrons do que o elemento cristalino, respectivamente). Assim, mais bandas são criadas, possibilitando o ajuste do *gap* de energia ao variar a composição e permitindo transições eletrônicas em comprimentos de onda específicos no espectro visível (luminescência em diferentes cores) (HINOV; TSANKOV; IBRISHIMOV, 2019; MIESSLER; FISCHER; TARR, 2014). O *LED* é chamado de lâmpada de estado sólido, pois os semicondutores estão nesse estado, sendo possível a sua produção em tamanhos pequenos e outras características já apresentadas. Destarte, o uso desses diodos como fonte de luz em telas de cristal líquido é mais eficaz, tem menor gasto de energia, permite um preto mais preto (pois cada pixel tem seu próprio *LED*, possibilitando ausência de luz no pixel) e já é uma realidade nas indústrias de mostradores digitais, dando origem a telas de *LED* atuais (TONG *et al.*, 2019).

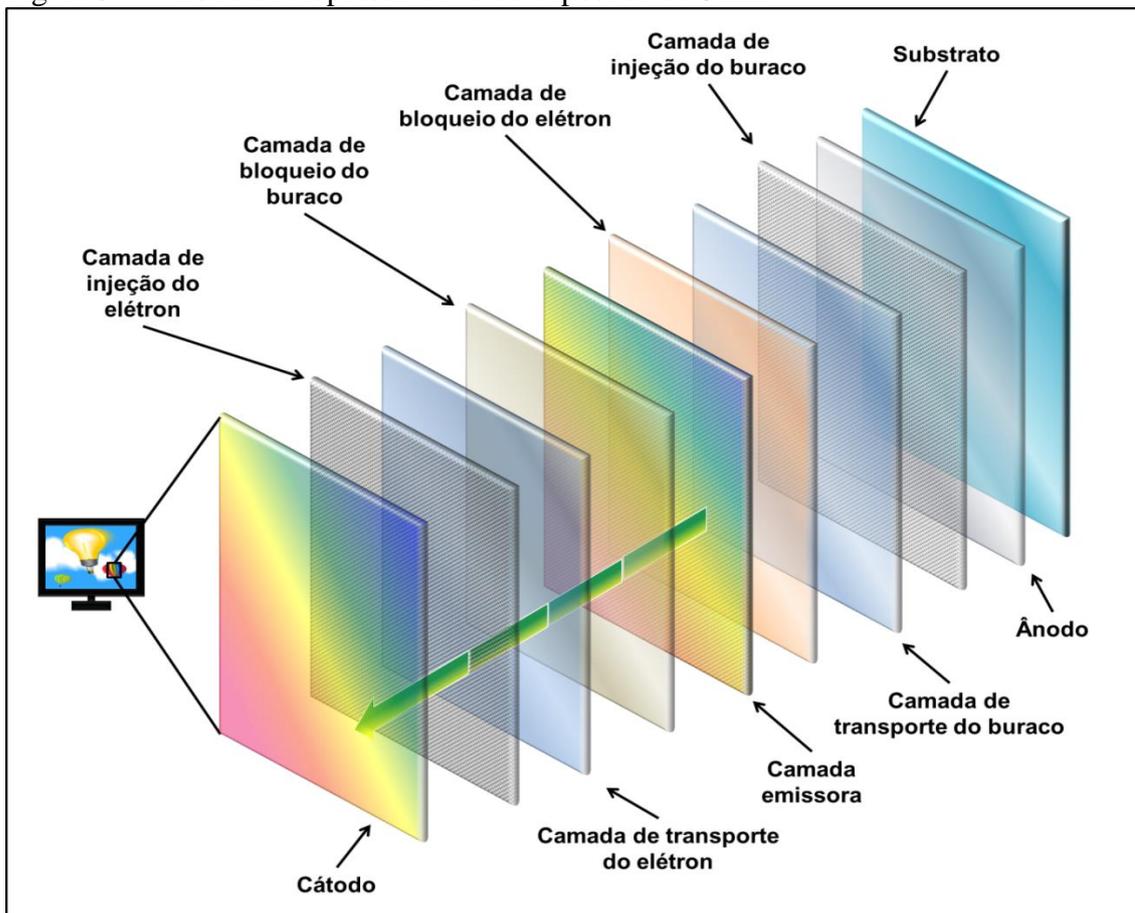
3.1.3 Expositor de OLED

Em 1963, observou-se a propriedade eletroluminescente em um antraceno de cristal único. Mais tarde, foi produzido filme desse material por meio de deposição térmica a vácuo que resultou em filme também eletroluminescente, porém, ainda de baixo desempenho funcional. Somente em 1990, foi anunciado dispositivo eletroluminescente com base em

polímeros, dando início à exploração científica e tecnológica de diodos orgânicos emissores de luz (*OLED*). A primeira geração de *OLED* brancos foi apresentada pela empresa LG® em 2009 e desde então muitos pesquisadores vêm aprimorando os estudos baseados nesses materiais orgânicos (FARINOLA; RAGNI, 2011; REINEKE *et al.*, 2013; YIN *et al.*, 2019; ZHANG *et al.*, 2015; ZHAO *et al.*, 2017).

A Figura 3 mostra uma representação da estrutura de telas *OLED*, o qual consiste em uma série de camadas de filmes orgânicos entre dois eletrodos de filme fino. Ao ser aplicado uma corrente elétrica, os portadores de carga (elétrons e buracos) deslocam-se entre os eletrodos passando pelo filme orgânico emissivo, que faz uma recombinação, emitindo calor e luz (HINOV; TSANKOV; IBRISHIMOV, 2019). A grande vantagem das telas de *OLED* é a não necessidade de uma fonte de luz traseira, pois o próprio material orgânico é eletroluminescente, tendo um menor gasto de energia e maior qualidade em comparação com os expositores de *LED*.

Figura 3 – Estrutura representativa do expositor de *OLED*.



Fonte: autora.

Vale salientar que há possibilidade de produção de *displays* flexíveis, ou com formatos curvados das telas *OLED*. Entretanto, há também muitas desvantagens como a limitada faixa de temperatura de trabalho, o menor tempo de vida útil, o alto custo e a baixa estabilidade do material orgânico, o que pode causar o efeito *burn-in*. Tal efeito é estabelecido pela queima induzida por fóton, processo de degradação de determinados pixels que envelhecem em taxas diferentes de seus adjacentes, comumente, causa queda de desempenho no expositor e pode apresentar imagens fantasmas por terem sido reproduzidas por um longo período de tempo (HUANG *et al.*, 2020; LAAPERI, 2008; TONG *et al.*, 2019).

3.1.4 Expositor de QLED

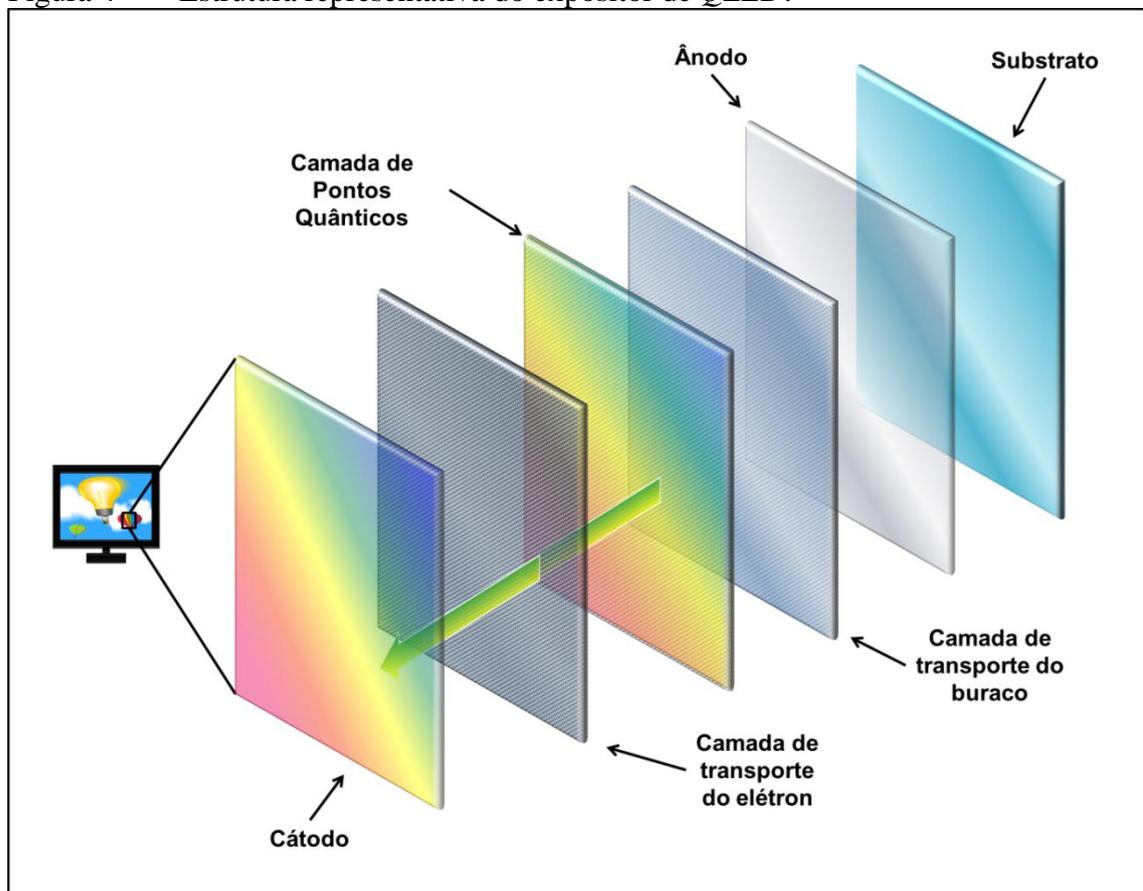
Outra nova tecnologia para aplicação em mostradores digitais é o Diodo Emissor de Luz de pontos Quânticos (*QLED*), grande concorrente dos *OLED*. Os Pontos Quânticos (PQ) são cristais semicondutores, classificados como nanomateriais e que seguem o modelo quântico proposto por Einstein em 1905 (RUDAN, 2015). Os nanomateriais são definidos como partículas em estados não ligado, ou agregado, ou aglomerado e que têm tamanho entre 1 e 100 nm em pelo menos uma de suas dimensões, levando em conta 50% ou mais das partículas na distribuição de tamanho de número, segundo recomendação da União Europeia sobre a definição de nanomateriais (WILLIAMS *et al.*, 2019). Nesse modelo, a energia é quantizada, diferentemente dos semicondutores maiores, que apresentam um *continuum* de estados (RUDAN, 2015).

Muitos experimentos mostraram que os espaçamentos do nível de energia dos PQ dependem do tamanho da partícula, quanto menor o *gap* de energia, maior o tamanho do PQ, essa propriedade é conhecida como Efeito de Confinamento Quântico (ECQ) (CAO *et al.*, 2018; CHA *et al.*, 2017; LV *et al.*, 2020; SHI *et al.*, 2019a). Nesse contexto, é possível verificar propriedade fotoluminescente desses nanomateriais, em que um elétron é excitado em uma energia específica e volta ao estado fundamental, emitindo um fóton em um comprimento de onda específico a depender do tamanho da partícula (MIESSLER; FISCHER; TARR, 2014). Atualmente, os PQ aplicados em expositores eletrônicos podem ser dopados e/ou variar de tamanho para alterar o *gap* de energia e obter as mais variadas emissões do espectro visível (HINOV; TSANKOV; IBRISHIMOV, 2019; PALONCÝOVÁ; LANGER; OTYEPKA, 2018).

Diante de suas especificidades, os PQ possuem aplicações em diversos setores: medicina, como agente de terapia fototérmica do câncer (XIE *et al.*, 2020); sensoriamento,

como sensor de temperatura (ZHANG *et al.*, 2020a), tecnológico, como dispositivos de energia (WANG *et al.*, 2020b), dentre outros (FILALI; PIROT; MIOSSEC, 2020; LV *et al.*, 2020). Atualmente, empresas como a Samsung® empregam nanocristais de PbTe, CdTe, CdSe na produção dos *QLED*, com a finalidade de aprimorar a qualidade dos *displays* (LIU *et al.*, 2020b; SINGH *et al.*, 2020b; YUAN *et al.*, 2017). A Figura 4 mostra uma representação da montagem de expositores *QLED*. Nesse sistema, os elétrons e buracos são inseridos ao ser aplicado uma corrente elétrica e transportados até a camada de PQ, no qual gera uma recombinação com a emissão de luz.

Figura 4 – Estrutura representativa do expositor de *QLED*.



Fonte: autora.

Estudos reportam os PQ com atributos relevantes para aplicação em expositores: alta eficiência luminosa, maiores brilho, vida útil, gama de cores e economia energética, quando comparado com os *OLED* (TONG *et al.*, 2019; ZHAO; ZHANG; XIA, 2020). No entanto, muitas dessas nanopartículas são potencialmente tóxicas, necessitando revesti-las ou imobilizá-las como um meio de proteção e evitar danos causados ao meio ambiente ou ao organismo (FILALI; PIROT; MIOSSEC, 2020). Dessa forma, é imprescindível a substituição

por materiais que se assemelhem em atributos físico-químicos dos PQ e que sejam amigáveis ao meio ambiente na tentativa de reduzir resíduos tóxicos causados por essas nanopartículas inorgânicas.

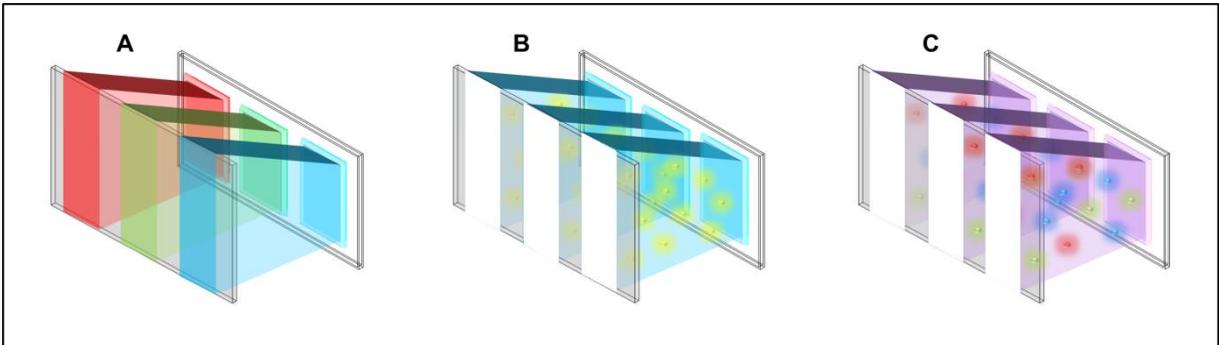
3.1.5 Diodo Emissor de Luz Branca

Para finalizar a abordagem de mostradores digitais, é necessário mencionar os Diodos Emissores de Luz Branca (*WLED*), que devem ser empregados em *displays* que se deseja apresentar uma gama de cores, independente do tipo específico de diodo (*LED*, *OLED* ou *QLED*). Para tal fim, é essencial a mistura das três cores emissivas primárias (vermelho, verde e azul), pois as diferentes combinações dessas cores resultam na cobertura de uma ampla faixa no espectro visível (entre 400 e 760 nm), semelhante ao espectro visível solar (HE *et al.*, 2020). Com efeito, a união de luz das três cores em similares proporções dará origem à luz branca pura, diodo mais almejado pelas indústrias de *LED*.

A luz branca pura pode ser comparada com diodos brancos já exigentes mediante parâmetros que caracterizam a sua qualidade e cor, padronizados pela *Commission Internationale de L'Eclairage* em 1931: Índice de Renderização de Cor (*CRI*), em uma escala de 0 a 100; Temperatura de Cor Correlacionada (*CCT*); e diagrama de cromaticidade da Comissão Internacional de Iluminação (*CIE*), uma representação gráfica da cor no plano xy com branco puro no ponto (0,33, 0,33) (WU; MA, 2016). Dessa forma, surge a busca pela produção de diodos brancos puros de alta qualidade, ou seja, *CIE* próximo do ponto (0,33, 0,33) e elevado *CRI*.

A produção das telas multicoloridas (ou com *WLED*) pode ser feita de distintos métodos, os principais são: tecnologia *RGB* (Vermelho-Verde-Azul), *LED* azul revestido por materiais fluorescentes amarelos e *LED* ultravioleta revestidos por semicondutores fotoluminescentes vermelho, azul e verde (e/ou amarelo) (FIGURA 5). A primeira dispõe de três fontes de luz coloridas (sub-pixels azul, vermelho e verde), gerando o pixel multicolorido nítido, mas que demanda mais espaço por conter três diodos, reduzindo qualidade de imagem (FIGURA 5A).

Figura 5 – Principais tecnologias *WLED*. (A) Tecnologia *RGB*. (B) *LED* azul revestido por semiconductor amarelo. (C) *LED* ultravioleta revestido por semicondutores fluorescentes vermelho, azul e verde.



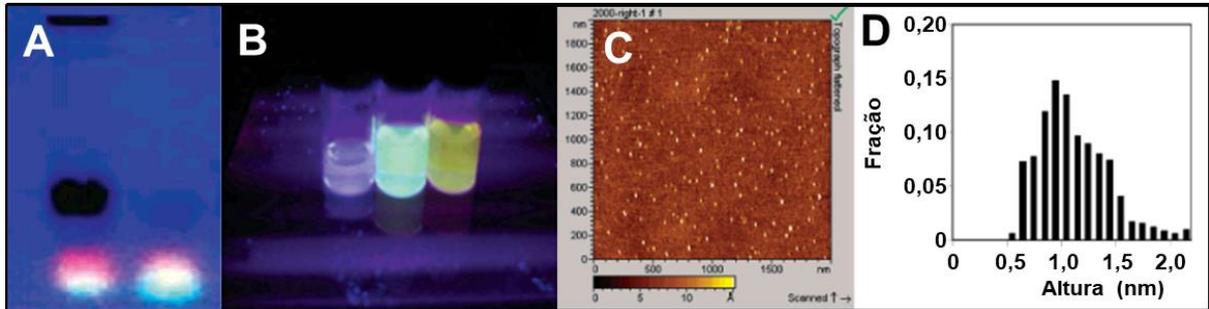
Fonte: adaptado de Hinov, Tsankov e Ibrishimov (2019).

O segundo é formado por um semiconductor dopado com terras raras e é bastante utilizado devido a sua alta eficácia luminosa (100 a 230 lm/W), porém tem um baixo *CRI* (50 a 80) devido à ausência das cores vermelha e verde (FIGURA 5B). O terceiro é geralmente constituído por semicondutores dopados com metais e excitados por uma fonte de luz ultravioleta. Embora tenha perdas energéticas em forma de calor, possui alto *CRI* (entre 95 e 96), melhor percepção das cores e estabilidade luminosa (FIGURA 5C) (HINOV; TSANKOV; IBRISHIMOV, 2019; QU *et al.*, 2019).

3.2 Pontos de Carbono

Alguns materiais a base de carbono e com tamanho de partícula em torno de 10 nm em pelo menos uma dimensão, podendo ser evidenciado por Microscopia de Força Atômica (*AFM*), são conhecidos na literatura como Pontos de Carbono (PC). Esses nanomateriais contêm grupos químicos funcionais na superfície e podem apresentar heteroátomos no interior (núcleo) de sua estrutura (RANI *et al.*, 2020). Os PC foram descobertos em 2004, quando Xu e colaboradores (2004) purificavam nanotubos de carbono derivados de fuligem por análise eletroforética e encontraram um nanomaterial fluorescente, ao qual chamaram de fragmentos de nanotubos de carbono fluorescentes (FIGURA 6). A partir de então, iniciou-se uma constante e crescente exploração dos PC para aplicações em diversos setores, principalmente como substitutos dos PQ inorgânicos (ASHRAFIZADEH *et al.*, 2020; KANG; LEE, 2019; LI *et al.*, 2020b; LUO *et al.*, 2020; SHAMSIPUR; BARATI; KARAMI, 2017; SHIRANI *et al.*, 2021; VERHAGEN; KELARAKIS, 2020).

Figura 6 – (A) Perfil eletroforético em gel de agarose a 1% sob luz UV de 365 nm da mistura de nanotubos de carbono brutos (lado esquerdo) e de carbono fluorescente (lado direito). (B) Suspensões de diferentes frações de carbono fluorescente em 365 nm. (C) Imagem topográfica da *AFM* da fração fluorescente laranja. (D) Distribuição da altura das nanopartículas para essa amostra, com base em dados de três imagens e 521 nanopartículas distintas.



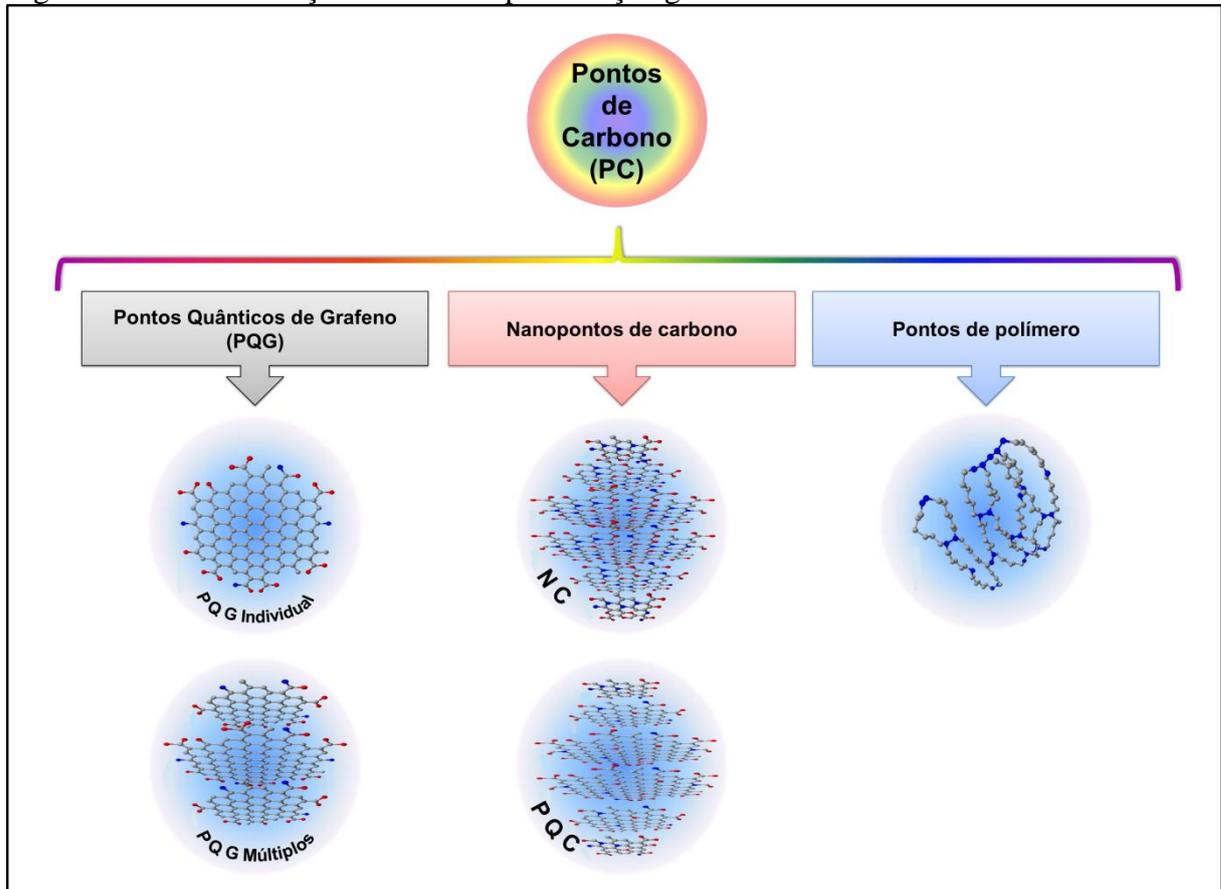
Fonte: modificado de XU *et al.*, 2004.

3.2.1 Classificação estrutural dos Pontos de Carbono

De acordo com Zhu e colaboradores (2015), os PC são divididos em três tipos: Pontos Quânticos de Grafeno (PQG), nanopontos de carbono e pontos de polímero. PQG são formados por folhas de grafeno e grupos funcionais ligados em suas bordas e são divididos em individual (formado por uma única folha gráfitica em formato de círculo) e múltiplos (formado por mais de uma folha gráfitica em formato de cilindro achatado). Nanopontos de carbono, por sua vez, têm formato quase-esférico e dividem-se em Pontos Quânticos de Carbono (PQC) e Nanopartículas de Carbono (NC). Pontos de polímero são agregados de polímeros formados a partir de monômeros ou polímeros lineares. A Figura 7 apresenta uma representação dos diferentes tipos de Pontos de Carbono (HU *et al.*, 2019; JEONG *et al.*, 2020; MEI *et al.*, 2020; RANI *et al.*, 2020).

A diferença característica entre as duas espécies de nanopontos de carbono (PQC e NC) é a cristalinidade, pois os PQC são mais cristalinos, enquanto as NC são mais amorfas (ARCUDI; ĐORĐEVIĆ; PRATO, 2019). Essa propriedade refere-se à organização das ligações químicas nos materiais, na qual quanto menos heteroátomos presentes entre as ligações C-C e menos carbonos sp^3 , mais organizada será a nanopartícula, sendo os nanopontos de carbono classificados como PQC. Sob outra perspectiva, quanto mais heteroátomos presentes entre as ligações C-C e mais carbonos sp^3 , mais desorganizado será o nanoponto de carbono e, portanto, classificado como NC (WANG *et al.*, 2017b). Sendo assim, é possível diferenciar PQC e NC verificando a cristalinidade pela razão entre a banda G (banda gráfitica) e a banda D (desordem) no espectro Raman (VEDAMALAI *et al.*, 2014).

Figura 7 – Classificação dos PC e representação genérica de cada um deles.



Fonte: autora.

As NC são constituídas por um núcleo composto por carbonos sp^2 , grupos funcionais passivados na superfície das nanopartículas (hidroxila, ácido carboxílico, amina, entre outros) e muitos defeitos de superfície do núcleo (carbonos sp^3 e heteroátomos como oxigênio, nitrogênio, boro e/ou enxofre e buracos causado pela ausência de carbono na estrutura grafítica), por isso, têm estrutura mais desorganizada (amorfa). A estrutura dos PQC é mais estável e é compreendida por folhas grafíticas sobrepostas, poucos defeitos de superfície do núcleo e grupos funcionais ou grupos químicos pós-modificados na superfície das nanopartículas. Todas essas características auxiliam na modulação de emissão em diferentes comprimentos de onda no espectro visível (CARNEIRO CRUZ *et al.*, 2019; PALONCÝOVÁ; LANGER; OTYEPKA, 2018; ZHU *et al.*, 2015).

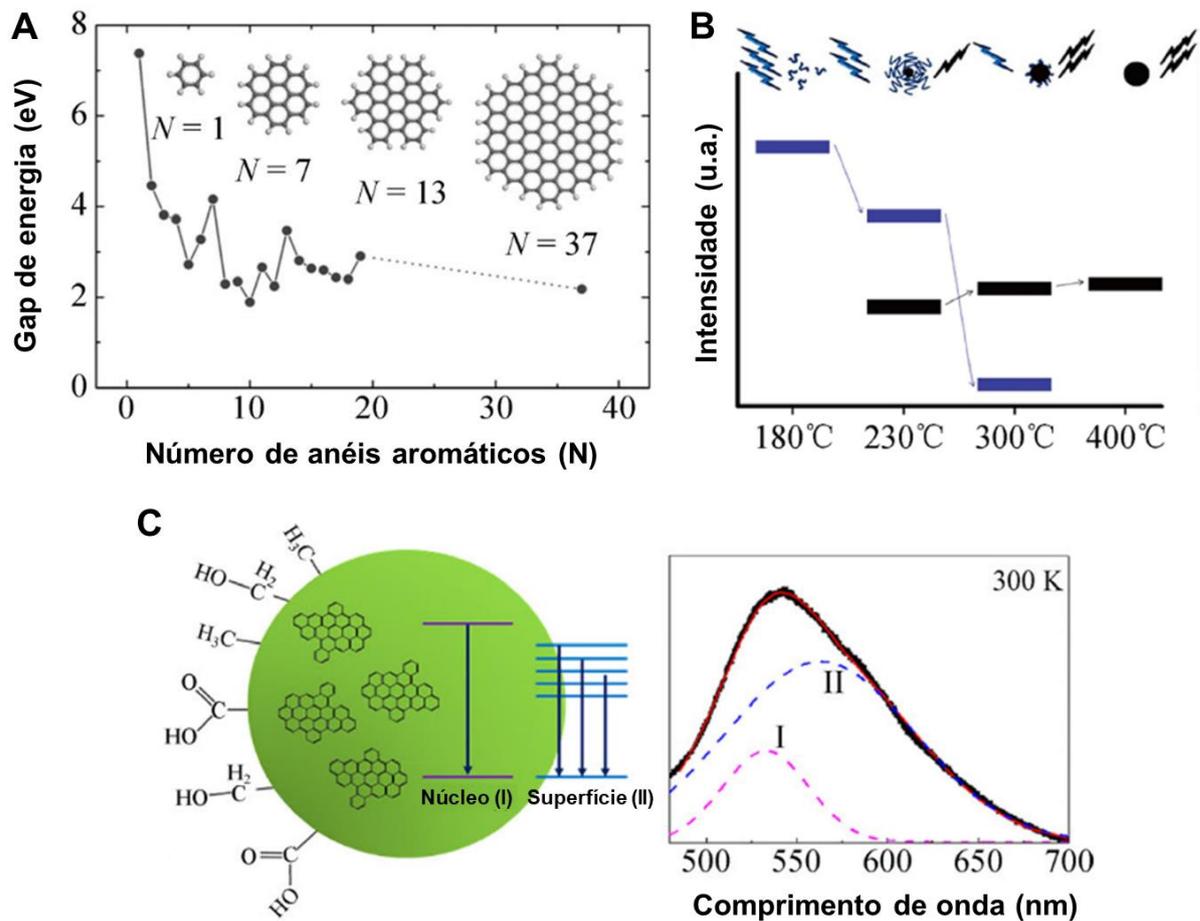
3.2.2 Propriedades físico-químicas dos Pontos Quânticos de Carbono

Os PQC apresentam alta complexidade em suas propriedades físico-químicas, pois existe diversidade de tamanho, de cristalinidade e de grupos químicos funcionais interferindo em suas características fotoluminescentes. Em geral, os PQC são biocompatíveis; têm baixa citotoxicidade (DHENADHAYALAN; LIN; SALEH, 2020); são anisotrópicos (XIA *et al.*, 2019); têm boa dispersibilidade em solventes polares e apolares (dependendo dos grupamentos químicos da superfície) (WU *et al.*, 2017), resultando em uma suspensão coloidal (verificado pelo efeito *Tyndall*); possuem fotoluminescência (obedecendo ao mesmo princípio de semicondutores quânticos); e boa fotoestabilidade, resultado da fotoluminescência proveniente do núcleo de carbono (ZHAN *et al.*, 2018).

Similar aos PQ, os PQC têm propriedades ópticas comuns: um elétron é excitado ao absorver radiação eletromagnética não ionizante e, ao retornar para o estado fundamental, emite energia como fóton. Porém, nos PQC sempre há perda energética devido a processos não radioativos e pode haver também alterações nos espectros de emissão devido a altas densidades ópticas (em altas concentrações), quando há sobreposição dos espectros de absorção e emissão (LAKOWICZ, 2006). Assim, a energia absorvida pelo elétron é maior do que a energia emitida, ou o comprimento de onda absorvido é menor do que o emitido, essa diferença é chamada de deslocamento Stokes (KUNDELEV *et al.*, 2019; LUO *et al.*, 2020). Geralmente as bandas de emissão dos PQC são amplas, quando comparados com corantes orgânicos ou PQ; têm longo deslocamento Stokes; e podem se relacionar com o comprimento de onda de excitação (λ_{exc}), ou seja, podem ter comportamento dependente desse comprimento de onda (HUXLEY, 1962; ZHU *et al.*, 2015).

Atualmente, algumas explicações relatadas na comunidade científica para as diferentes emissões em diferentes regiões do espectro visível dos PC são: Efeito de Confinamento Quântico (ECQ), Estado da Molécula (EM), Estado de Superfície (ES), e efeito de emissão aprimorada por reticulação, este último característico dos pontos de polímero. O ECQ é referente aos domínios π conjugados que cresce com o aumento do tamanho das partículas, reduzindo o *gap* de energia, e é estabelecido pelas transições eletrônicas que ocorrem devido às ligações duplas entre os carbonos, isolados pelos defeitos no plano da folha grafitica (FIGURA 8A) (XIA *et al.*, 2019; ZHU *et al.*, 2015).

Figura 8 – Propriedade fotoluminescente dos PQC em distintos comprimentos de onda de emissão ou *gap* de energia. (A) Efeito de Confinamento Quântico. (B) Estado da Molécula. (C) Estado de Superfície.



Fonte: modificado de ZHU *et al.*, 2015.

O EM é estabelecido exclusivamente por grupos fluoróforos orgânicos, conectados na superfície ou no interior dos PC, exibindo uma forte emissão quando comparado com a emissão somente do núcleo de carbono (FIGURA 8B). Por outro lado, o ES é estabelecido por hibridização do esqueleto de carbono junto a grupos químicos conectados na borda de sua superfície, ocasionando emissão em comprimentos de ondas maiores devido ao surgimento de novos orbitais (FIGURA 8C). Assim, com diferentes tamanhos e grupos de superfície, é possível obter diferentes transições eletrônicas, relacionadas ao surgimento de armadilhas entre as bandas de valência e de condução (XIA *et al.*, 2019; ZHU *et al.*, 2015).

Um parâmetro de comparação da fotoluminescência dos PQC é o Rendimento Quântico (RQ), que é o número de fótons emitidos em razão do número de fótons absorvidos. Para o seu cálculo, utiliza-se como referência outro material fluorescente já conhecido na literatura, como sulfato de quinina, isotiocianato de fluoresceína e rodamina B de referências

em emissões no azul, verde e vermelho, respectivamente (MIAO *et al.*, 2018). ECQ, ES, EM e defeitos de superfície representam contribuições significativas no aprimoramento da fotoluminescência e no aumento de RQ dos PQC. Outros fatores que influenciam o comportamento emissivo dessas nanopartículas são o potencial hidrogeniônico (pH) e o tipo de solvente usado (similar ao efeito solvatocrômico, observado em corantes orgânicos) (MA *et al.*, 2020a; WU *et al.*, 2017).

Nos últimos anos, a literatura científica enriqueceu-se de trabalhos relatando a obtenção de novos PQC ou o aperfeiçoamento destes, incluindo heteroátomos no núcleo ou por modificações na superfície (GAO *et al.*, 2020a; HOLÁ *et al.*, 2017; ZHU *et al.*, 2018). A modificação consiste na interação entre os PQC e grupos funcionais ou moléculas presentes no meio, por ligações covalentes ou não covalentes (YAN *et al.*, 2018). Desse modo, os PQC têm sido bastante abordados no meio científico, devido à sua alta estabilidade, produção em larga escala, baixo custo, baixa toxicidade, vasta possibilidades de produção e com valores de RQ cada vez mais altos (RANI *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2017c; YUAN *et al.*, 2019a). Porém, a pluralidade de novos PQC e de sua complexidade estrutural fornece um variado leque de estudos que muitas vezes geram divergências entre os autores nas explicações das suas propriedades fotoluminescentes.

Por exemplo, segundo Zhu e colaboradores (2015), em grande parte das situações, a cor fotoluminescente é influenciada tão somente pelos grupos funcionais e não se observa o ECQ, ao contrário do que já foi relatado por outros pesquisadores (GAO *et al.*, 2020b; HU *et al.*, 2019; WANG *et al.*, 2017b). Yao e colaboradores (2019) ratificam essa informação justificando que grupos funcionais e os defeitos de superfície geram um centro de recombinação (ou armadilha) de elétron excitado e orifício, logo, a fotoluminescência é influenciada pelo ES e defeitos de superfície. Isso pode refletir em uma maior eficácia de fotoluminescência quando houver uma funcionalização na superfície dos PQC ou em uma escolha minuciosa do(s) precursor(es) com grupos funcionais específicos. A funcionalização consiste em reações orgânicas de substituição, eliminação ou adição, favorecendo a formação de grupos funcionais de forma controlável.

3.2.3 Síntese dos Pontos de Carbono

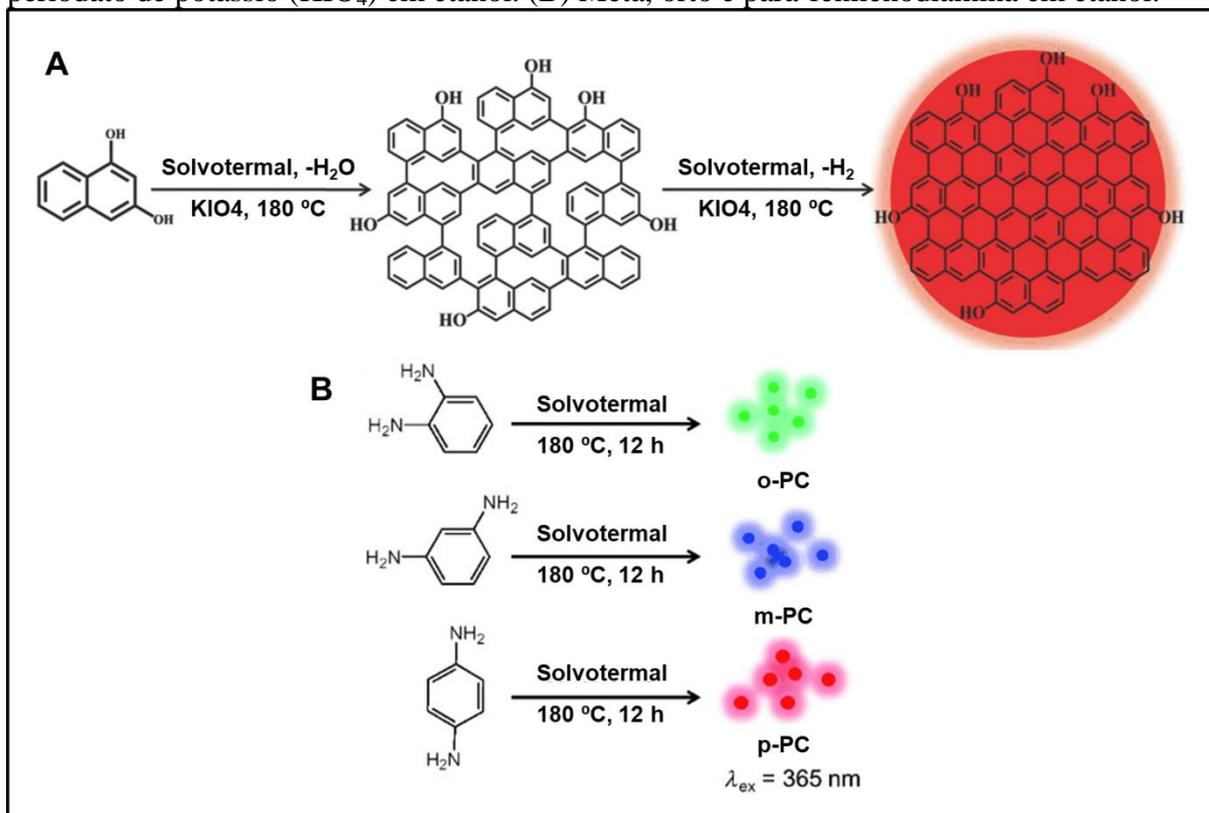
De modo geral, pode-se obter PC pelas abordagens: *top-down* e *bottom-up*. Na abordagem *top-down*, parte-se de estruturas carbônicas maiores como grafite, grafeno, nanotubos de carbono e fulerenos para gerar os PC por meio de forças físicas, como descarga

de arco, ablação a laser e oxidação química (HUANG *et al.*, 2019). A via *bottom-up*, por sua vez, viável para produção em larga escala, consiste na condensação ou desidrogenação de precursores menores, como carboidratos, ácidos orgânicos e polímeros por meio de síntese em micro-ondas (MAHMOUD; FEKRY; ABDELFATTAH, 2020), decomposição térmica (CARNEIRO CRUZ *et al.*, 2019) ou reação solvotérmica (YAO *et al.*, 2020), este geralmente produzindo os PQC e bastante utilizado no meio acadêmico devido à simplicidade do método (RANI *et al.*, 2020).

Diferentes métodos de síntese produzem diferentes tipos de PQC, pois fatores de reação, como concentração ou tipo de precursores (JIANG *et al.*, 2019), tempo de síntese (CHEN *et al.*, 2016), solvente (TIAN *et al.*, 2017), pH (MA *et al.*, 2020a), pressão e temperatura (HU *et al.*, 2019b), afetam a estrutura dos PQC formados, variando tamanho, defeitos de superfície e funcionalização (ES) de modo estocástico (YAO *et al.*, 2019). Por isso, os PQC são encontrados em um vasto campo de estudos cujas propriedades podem ser exploradas por meio do controle e otimização dos parâmetros de reação para a manipulação de tamanho e composição.

Muitos autores preferem partir de fontes naturais, como resíduos orgânicos, alimentos, plantas e material humano, porém, nesses casos a reprodutibilidade é baixa e não se sabe ao certo qual a origem dos PQC, levando em conta que essas fontes possuem uma composição variada (CHAUDHARY *et al.*, 2020; PARK *et al.*, 2020; SINGH *et al.*, 2020a; WANG *et al.*, 2020a). Uma forma de evitar tais adversidades é o uso de reagentes com um determinado grau de pureza. Essas fontes moleculares são bastante abordadas com o emprego de reagentes Para Análise (PA). Exemplificando, Wang e colaboradores (2017c) produziram PQC com emissão no vermelho, utilizando 1,3-Diidroxinaftaleno como fonte de carbono e oxigênio (FIGURA 9A). Por outro lado, Jiang e outros (2015) utilizaram *meta*, *orto* e *para*-fenilenodiamina, como fontes de carbono e nitrogênio, para produção de PQC com emissões no azul, verde e vermelho, respectivamente (FIGURA 9B).

Figura 9 – Rotas sintéticas partindo de diferentes precursores. (A) 1,3-Diidroxinaftaleno e periodato de potássio (KIO₄) em etanol. (B) Meta, orto e para-fenilenodiamina em etanol.



Fonte: modificado de Wang (2017c) e Jiang (2015) e colaboradores.

Ambos os autores utilizaram o método solvotermal, na mesma temperatura (180 °C) e o mesmo solvente (etanol). A reação solvotérmica consiste em aquecer um reator de teflon, contendo os precursores diluídos em solvente específico, revestido por uma autoclave de aço inoxidável, que permite uma vedação hermética do teflon. O aumento da temperatura em um sistema fechado favorece o aumento da pressão, gerada pelo solvente, deixando o ambiente propício à formação dos PQC, ocasionada pelo processo de automontagem (RANI *et al.*, 2020). Além disso, esse método é bastante explorado, pois tem baixo custo e é considerado seguro.

Após a síntese desses nanomateriais, pode ser necessário remover subprodutos e resquícios de reagentes. Isso é possível através dos métodos comuns de purificação como centrifugação (LI *et al.*, 2020a), filtração (ambos para subprodutos mais densos) e diálise (para partículas menores) (ARCUDI; ĐORĐEVIĆ; PRATO, 2019). Eletroforese em gel (DAVARDOOSTMANESH *et al.*, 2020), cromatografia de troca iônica (HOLÁ *et al.*, 2017) e cromatografia de fase normal (DING *et al.*, 2016) são outras formas de purificação quando se deseja separar PQC de diferentes tamanhos, cargas de superfície e grau de oxidação da superfície (polaridade), respectivamente.

3.2.4 Aplicações dos Pontos Quânticos de Carbono

Diante da excelente propriedade fotoluminescente e da baixa toxicidade destes nanomateriais, os PQC tem potencial para aplicação nos campos: medicinal, em tratamentos de câncer, como carreador (SU *et al.*, 2020) ou sonda de drogas anticâncer (MUTHUSANKAR; DEVI; GOPU, 2020); ambiental, como sensores químicos para determinação de metais (HU *et al.*, 2020) ou pesticidas em alimentos (CARNEIRO *et al.*, 2019), ou como fotocatalisadores para decomposição de corantes orgânicos (HAN *et al.*, 2020); tecnológica, para o aprimoramento de células solares (WEN; ZHU; SHAO, 2020) ou de LED (WEI *et al.*, 2020), substituindo os PQ inorgânicos; dentre outros (KANG; LEE, 2019). Dentre essas aplicações, a indústria de diodos se destaca devido ao constante e crescente desenvolvimento tecnológico.

Dispositivos desenvolvidos com diodos compostos por PQ, formados por metais como Cd, Te, As, Se, Pb e outros, apresentam toxicidade, que causam danos ambientais e riscos à saúde (KARGOZAR *et al.*, 2020; KAYS *et al.*, 2020; MATOS *et al.*, 2020; TATSI; HUTCHINSON; HANDY, 2020). Desse modo, a substituição desses nanocristais semicondutores por PQC é uma forma de minimizar os impactos ambientais causados pelo uso e descarte inapropriado dos dispositivos eletrônicos, além de aprimorar, semelhante aos PQ, eficiência e qualidade do *display* (YAO *et al.*, 2019).

Muitos pesquisadores reportam que obter luz natural, ou branca pura, com altos padrões de excelência é uma tarefa difícil, pois o controle de nanopartículas que possuem emissão em todo o espectro eletromagnético visível, desde comprimentos de onda mais curtos do azul profundo até os mais longos do vermelho puro, tem alto grau de precisão (HE *et al.*, 2020; LIN *et al.*, 2020; QU *et al.*, 2019; YIN *et al.*, 2019). Além disso, há muitos esforços para o aumento de RQ de PQC com emissão no vermelho, pois há um declínio de intensidade desse comprimento de onda de emissão (λ_{em}), o que reduz a eficiência luminosa dessa cor na luz branca (WANG *et al.*, 2017a; YUAN *et al.*, 2018).

O aperfeiçoamento de desvio para o vermelho pôde ser demonstrado manipulando tamanho e/ou química dos PQC (GAO *et al.*, 2018; LIU *et al.*, 2020a). No entanto, a compreensão dos pesquisadores em relação à contribuição de cada defeito de superfície ou grupo funcional para maiores comprimentos de onda ainda é incerto. Na prática, PQC formados por precursores que possuem grupos nitrogenados, por meio de reações nucleofílicas de substituição e desidratação, apresentaram energia de transição ajustável entre 1,30 e 2,23 eV, ou seja, fotoluminescente com emissões do azul ao vermelho, em decorrência

da ressonância entre os carbonos do núcleo grafítico e das porções de nitrogênio (YAO *et al.*, 2019).

Visando facilitar e baratear o custo da produção dos *QLED*, é viável a utilização de nanopartículas de tamanhos distintos incorporadas em matriz sólida (na forma de tinta ou filme polimérico, por exemplo), apresentando emissão de luz em toda a região do espectro visível (KHAN; ABAS, 2011; MOLAEI *et al.*, 2012). Assim, a incorporação dos PQC em matrizes sólidas é essencial para aplicação em diodos de luz, que também estão em estado sólido, e para exibição da estabilidade característico dos PQC. Para tanto, pode-se aplicar matrizes poliméricas que não interfiram na emissão dos PQC, ou seja, que possuem transparência óptica, independente da fonte de excitação fornecida. Alguns polímeros que se encaixam nesse parâmetro são álcool polivinílico (*PVA*), polimetilmetacrilato, poliestireno, poliacrilamida, poliuretano, polietilenoglicol, quitosana, dentre outros (KOVÁČOVÁ *et al.*, 2020).

Propriedades dos polímeros como baixa toxicidade, estabilidade atmosférica, durabilidade, flexibilidade, facilidade de preparação e baixo custo são imprescindíveis para a escolha ideal da matriz, que dependem de qual aplicação deseja-se realizar (DU *et al.*, 2021; MA *et al.*, 2020a). Dentre os polímeros citados, *PVA* é o mais viável, economicamente, solúvel em água e facilmente moldável, sendo, portanto, bastante usado para a incorporação de PQC nos laboratórios de pesquisa (EL-SHAMY; ZAYIED, 2020; JIANG *et al.*, 2015; ZHAO *et al.*, 2020). Diante do exposto, este trabalho tem por objetivo principal a contribuição científica para a inovação tecnológica com o intuito de preparar Diodo Emissor de Luz Branca de Pontos Quânticos de Carbono Multicolorido incorporados em *PVA* (*PVA/PQCM-WLED*), sendo economicamente e ecologicamente viável.

4 METODOLOGIA

4.1 Materiais e instrumentação

Ácido cítrico anidro ($C_6H_8O_7$; 99,5% m/m), N,N-dimetilformamida (DMF, $HCON(CH_3)_2$, 99,8% m/m), hidróxido de sódio em lentilhas (NaOH, 97% m/m), álcool etílico (C_2H_6O , 95% m/m), (3-aminopropil)trietoxissilano (APTES, $C_9H_{23}NO_3Si$, $\geq 98\%$ m/m), sulfato de quinina ($(C_{20}H_{24}N_2O_2)_2 \cdot H_2SO_4 \cdot 2H_2O$, 99,0-101,0% m/m) e ácido sulfúrico (H_2SO_4 , 95,5% m/m) da marca Vetec/Sigma-Aldrich; ureia (CH_4N_2O , 99,0-100,5% m/m) e ácido clorídrico (HCl, 36,5-38,0% m/m) da marca Synth; álcool polivinílico (PVA, $(C_2H_4O)_n$, 95% m/m) da marca Dinâmica. Todos os reagentes foram utilizados sem tratamento prévio.

Balança analítica *A&D Weighing*, modelo HR-120; reator de teflon de 30 mL e autoclave de aço inoxidável; estufa Olidef cz; liofilizador de bancada JJ científica, linha LJJ; kit padrão de pH/mV de bancada (*FiveEasy Benchtop F20 pH/mV Standard Kit*); agitador magnético com aquecimento Fisatom, modelo 752A; estufa Heraeus, modelo RVT 360; LED azul de 434 nm da marca Qingying e WLED da marca Epistar (10000 K), ambos com potência de 3W, tensão de 3,2 a 3,6 V, corrente elétrica de 600 a 700 mA e medidas de 6×20×20 mm.

4.2 Síntese de Pontos Quânticos de Carbono Multicolorido (PQCM)

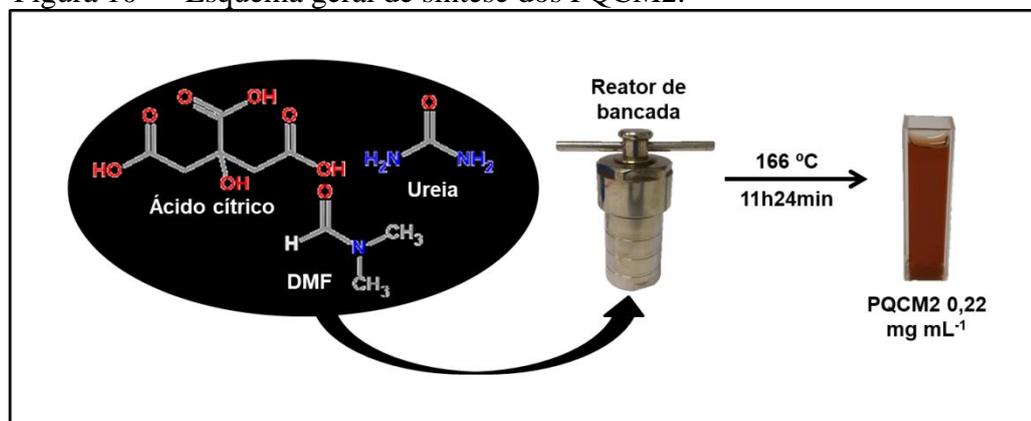
Baseado na metodologia descrita por Song e colaboradores (2019) para a produção de PQC vermelhos, foi realizado um planejamento composto central de base fatorial 2^2 com $\alpha = \sqrt{2}$ e um total de 11 experimentos, sendo avaliadas as variáveis de tempo e temperatura de síntese, como é mostrado na Tabela 1. Para a síntese 2, ácido cítrico e ureia (aproximadamente 1,0 g e 0,5 g, respectivamente) foram solubilizados em 10,0 mL de DMF e aquecidos sob temperatura de 166 ± 7 °C em um reator de teflon de 30,0 mL revestido por uma autoclave de aço inoxidável por 11 horas e 24 min (FIGURA 10). A suspensão de PQCM2 foi armazenada após o seu resfriamento em temperatura ambiente. O mesmo procedimento foi realizado para as outras 10 sínteses, com a variação de tempo e temperatura reais mostradas na Tabela 1. Uma pequena quantidade de PQCM2 foi liofilizada para realizar caracterizações estruturais (*FTIR* e *XPS*).

Tabela 1 – Planejamento experimental composto central de base fatorial 2^2 para a produção de PQCM, variação de tempo e temperatura de síntese.

Síntese (nomenclatura)	Variáveis independentes			
	Tempo		Temperatura	
	Codificado	Real (h)	Codificado	Real (°C)
1 (PQCM1)	-1	8,6	-1	166
2 (PQCM2)	1	11,4	-1	166
3 (PQCM3)	-1	8,6	1	194
4 (PQCM4)	1	11,4	1	194
5 (PQCM5)	$-\sqrt{2}$	8,0	0	180
6 (PQCM6)	$\sqrt{2}$	12,0	0	180
7 (PQCM7)	0	10,0	$-\sqrt{2}$	160
8 (PQCM8)	0	10,0	$\sqrt{2}$	200
9 (PQCM9)	0	10,0	0	180
10 (PQCM10)	0	10,0	0	180
11 (PQCM11)	0	10,0	0	180

Fonte: elaborada pela autora.

Figura 10 – Esquema geral de síntese dos PQCM2.



Fonte: autora.

4.3 Caracterização dos Pontos Quânticos de Carbono Multicolorido

4.3.1 Espectroscopia no Ultravioleta-Visível

As medidas de espectroscopia na região do Ultravioleta-visível (UV-Vis) em meio aquoso das 11 sínteses foram realizadas usando um espectrofotômetro da marca Shimadzu, modelo UV-2600, em cubeta de quartzo de 1 cm de percurso óptico. Esses espectros foram

obtidos na Central Analítica do Programa de Pós-graduação em Química, localizada na Universidade Federal do Ceará (UFC).

4.3.2 Espectroscopia de Fotoluminescência

Os espectros de Fotoluminescência (PL) foram obtidos utilizando um espectro fluorofotômetro Shimadzu, modelo RF-6000, em cubeta de quartzo de 1 cm de percurso óptico. As medidas foram feitas em diferentes concentrações (0,36 a 0,01 mg mL⁻¹) de PQCM em meio aquoso da síntese selecionada (síntese 2) a partir da curva de contorno e em diferentes fontes de excitações (330 a 560 nm, com variação de 10 em 10 nm). O rendimento quântico foi calculado a partir da Equação 1, utilizando sulfato de quinina como referência e fonte de excitação de 350 nm em seis replicatas:

$$RQ = RQ_r \left(\frac{I}{I_r} \right) \left(\frac{A_r}{A} \right) \left(\frac{n}{n_r} \right)^2 \quad (1)$$

onde I é a área integrada do espectro de emissão; A é a intensidade de absorção, abaixo de 0,07 para minimizar o efeito de filtro interno, no comprimento de onda de excitação; n é o índice de refração do solvente e o subscrito r é relacionado aos valores da molécula fluorescente padrão (HE *et al.*, 2017).

Além disso, soluções de pH 1,18 a 12,55 (1,18; 1,87; 2,87; 4,24; 9,82; 10,75; 11,9; 12,55), usando HCl e NaOH e com o auxílio de um pHmetro, foram preparadas a fim de verificar a fotoluminescência dos PQCM2 0,22 mg mL⁻¹ nessas soluções. Assim, os espectros de PL (excitação de 450 nm) foram obtidos, e a intensidade máxima de emissão de cada suspensão foi plotada em gráfico em função do pH. Também foi investigada a intensidade de emissão máxima de suspensões aquosas de PQCM2 0,01 mg mL⁻¹ nos comprimentos de onda de excitação de 340, 450 e 550 nm em função do tempo. Ambas as análises foram realizadas em triplicata na Central Analítica do Programa de Pós-graduação em Química, localizada na UFC.

4.3.3 Potencial zeta (ζ)

O valor do potencial zeta da superfície de PQCM2 0,01 mg mL⁻¹ em meio aquoso foi obtido utilizando um modelo Malvern Zetasizer Nano ZS, localizado no Laboratório de Materiais Funcionais Avançados (LaMFA) do Departamento de Física da UFC. A análise foi realizada em triplicata.

4.3.4 Microscopia de Força Atômica

As imagens de *AFM* foram obtidas utilizando um microscópio Asphalt Research, modelo MFP-3D. A partir da micrografia obtida, foi traçada uma linha que permitiu avaliar a topologia dos PQCM2 e inferiu-se a dimensão das nanopartículas. As micrografias foram obtidas no Laboratório de Microscopia de Força Atômica, Departamento de Física da UFC.

4.3.5 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier

Foi obtido espectro vibracional na região do infravermelho para a amostra de PQCM2. A amostra foi analisada em pastilha de KBr e utilizando um espectrômetro da marca Shimadzu, modelo IRTracer-100, varredura de 4000 a 400 cm^{-1} . Essa análise foi realizada na Central Analítica do Programa de Pós-graduação em Química na UFC.

4.3.6 Espectroscopia Raman

O espectro Raman foi obtido com um espectrômetro Shamrock, modelo SR303i. Foi utilizado a linha de 632,8 nm do laser para a excitação espectral, grade de 600 L mm^{-1} , filtro ajustável com 3 acumulações de 30 s e coletado por uma lente objetiva Nikon de 1,4 NA. Análise realizada no Laboratório de Espectroscopia Vibracional no departamento de física da UFC.

4.3.7 Espectroscopia de Fotoelétrons Excitados por raios X

O espectrômetro fotoeletrônico de raios X da marca ThermoFisher Scientific modelo K-alpha+ foi usado para a obtenção dos espectros de XPS, operando com uma excitação monocromática de Al K_{α} de 200 eV para a varredura completa e 50 eV para os espectros de alta resolução. A pressão na câmara de análise era de aproximadamente 10^{-7} Pa. O ajuste de pico foi feito usando o software Advantage fornecido pelo fabricante do equipamento, com curvas Gaussianas/Lorentzianas mistas. A espectroscopia de XPS foi realizada no Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas, localizado na Universidade Federal do ABC.

4.4 Incorporação dos Pontos Quânticos de Carbono Multicolorido em matriz polimérica

Cerca de 0,8 g de *PVA* foi solubilizado em uma solução etanólica (23% v/v). PQCM2 72 mg mL⁻¹ (0,01; 0,02; 0,04; e 0,06 mL) e APTES foram misturados em uma proporção de 1:1 (v/v) de PQCM:APTES. Em seguida, a solução filmogênica foi acrescentada à mistura de PQCM2/APTES, agitada em aquecimento por 5 min e moldada em placa de Petri de 6×1 cm por 48 h a 60 °C.

4.4.1 Caracterização das propriedades térmicas dos filmes fotoluminescentes

A investigação da estabilidade térmica do filme *PVA* e dos compósitos preparados foi analisada por termogravimetria (ATG) e Calorimetria Exploratória Diferencial (*DSC*). As curvas termogravimétricas foram obtidas em um equipamento da marca Perkin Elmer, modelo STA 6000, sob atmosfera de ar sintético (fluxo de 50 mL min⁻¹) e taxa de aquecimento de 10 °C min⁻¹ em uma faixa de temperatura entre 25 a 800 °C. Utilizou-se cadinho alumina cerâmica com aproximadamente 5 mg de amostra.

Os termogramas *DSC* foram obtidos utilizando um equipamento Mettler-Toledo, modelo *DSC* 823e. As amostras foram colocadas em cadinhos de platina (entre 2 e 5,5 mg) e aquecidas de 25 a 300 °C, sob atmosfera de ar sintético (vazão de 50 mL min⁻¹) e taxa de aquecimento de 10 °C min⁻¹. A temperatura de transição vítrea (T_v) foi definida como o ponto médio da mudança na capacidade de calor e a temperatura de fusão (T_f) foi estabelecida pelo ponto máximo do evento endotérmico. As análises térmicas foram realizadas no Laboratório de Produtos e Tecnologia em Processos (LPT), localizado na UFC.

4.4.2 Caracterização da propriedade luminescente do diodo emissor de luz

Os filmes poliméricos preparados foram acomodados sobre um *LED* com comprimento de onda de 434 nm para análise óptica. O espectrofotômetro da marca Ocean Optics, modelo HR2000+, foi usado para obtenção do espectro de luminescência do *PVA/PQCM2-WLED* e de um *WLED* comercial. O programa ColorCalculator v 7.77.0.0 foi usado para apresentar as coordenadas de cromaticidade *CIE* 1931 e os espectros coloridos de luminescência.

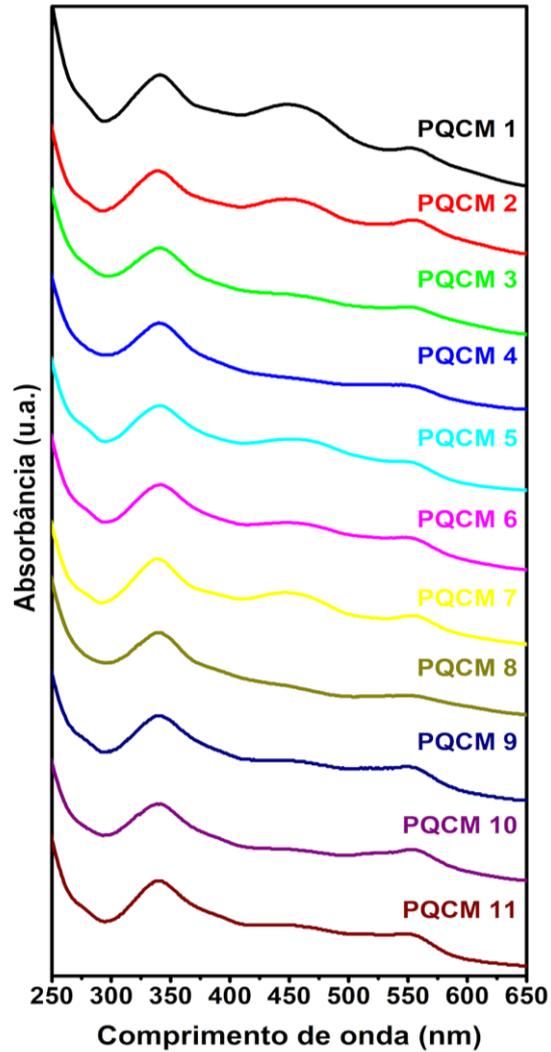
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização dos Pontos Quânticos de Carbono Multicolorido

A Figura 11 apresenta os espectros de absorção na região do ultravioleta-visível (UV-Vis) para todas as 11 sínteses de PQCM realizadas neste trabalho. Em todos os espectros é possível observar três bandas distintas em 340, 450 e 550 nm aproximadamente. No entanto, nos espectros das sínteses 3, 4, 8, 9, 10 e 11, nota-se uma menor intensidade da banda em 450 nm. A razão das Intensidades de absorbância entre as bandas 450 (I_{450}) e 340 (I_{340}) nm e a razão das Intensidades de absorbância entre as bandas 550 (I_{550}) e 450 nm foram plotadas em curvas de contorno mostradas na Figura 12 para uma melhor visualização das maiores intensidade das bandas analisadas.

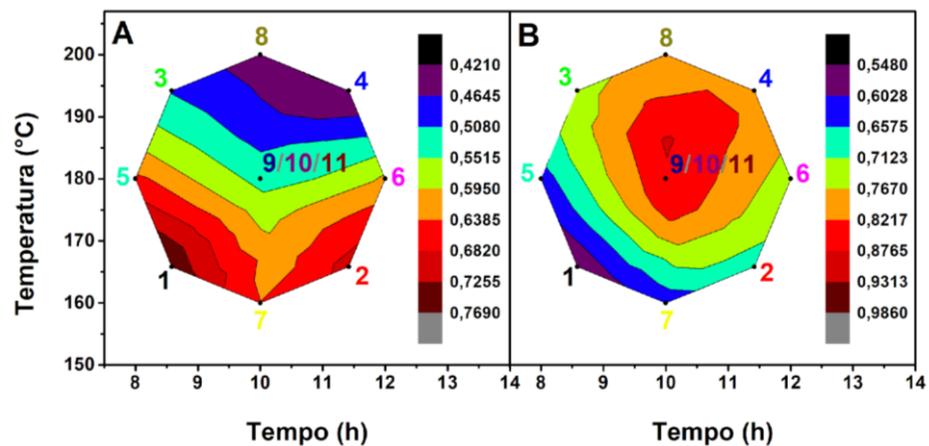
No gráfico da razão I_{450}/I_{340} , as maiores razões encontram-se nas sínteses com menores temperaturas (1, 2 e 7) (FIGURA 12A). Por outro lado, no gráfico da razão I_{550}/I_{450} , os maiores valores se concentram nas sínteses do ponto central (9, 10 e 11) (FIGURA 12B). Contudo, dentre as sínteses que possuem maior intensidade em 450 nm, a síntese 2 possui também alta intensidade para a banda em 550 nm, as duas razões entre as intensidades das bandas em cerca de 0,7. Sendo assim, em comparação às outras sínteses, a síntese 2, com o tempo de 11 horas e 24 minutos e temperatura de 166 °C, apresentou maiores intensidades de absorção em 450 e 550 nm e uma melhor resposta para emissões em toda a região do visível, visto que a quantidade de emissão é proporcional à quantidade de absorção para um mesmo material (CAI *et al.*, 2019). Portanto, a amostra de PQCM2 foi selecionada para as caracterizações morfológicas e estruturais.

Figura 11 – Espectros de UV-Vis das 11 sínteses do planejamento experimental.



Fonte: autora.

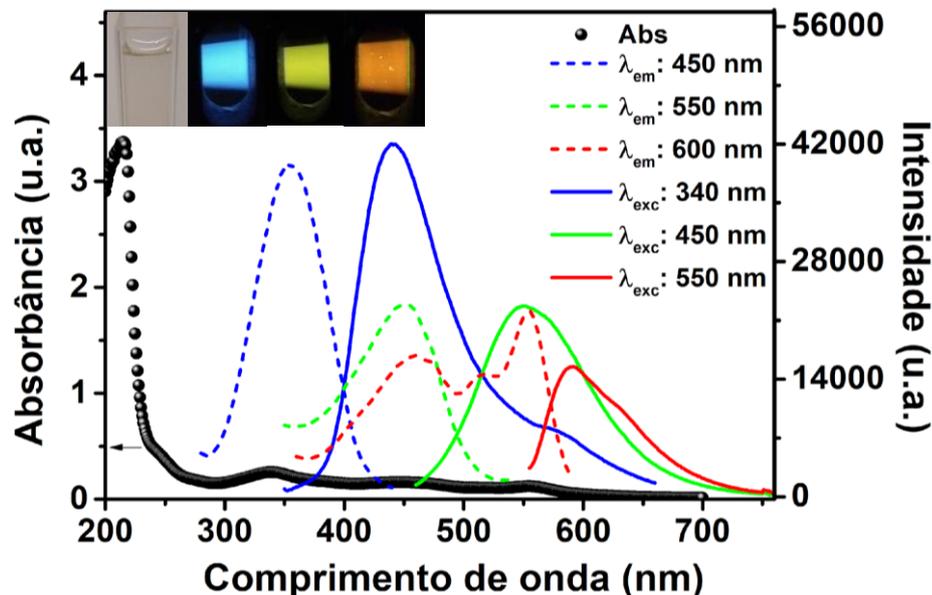
Figura 12 – Curvas de contorno das razões entre as Intensidades das bandas de absorção (A) I_{450}/I_{340} e (B) I_{550}/I_{450} .



Fonte: autora.

Na Figura 13 são mostrados espectros de absorção, de emissão em diferentes λ_{exc} e de excitação em diferentes λ_{em} dos PQCM2 em suspensão aquosa. No espectro de UV-Vis é possível observar uma banda intensa em 215 nm além das três bandas já mencionadas. Conforme Yao e colaboradores (2019), apesar das diferentes estruturas químicas dos PC, estes costumam apresentar uma forte banda de absorção na região do ultravioleta que decai para região do visível atribuída às transições $\pi-\pi^*$ do sistema de elétrons π conjugados e $n-\pi^*$ dos átomos de oxigênio e nitrogênio presentes na estrutura, mas que as intensidades e formatos são regulados por defeitos ou modificações de superfície. Portanto, as bandas em 215 e 340 nm são atribuídas às transições $\pi-\pi^*$ das ligações C=C e $n-\pi^*$ referente às ligações C=O e C=N, respectivamente. As bandas em 450 e 550 nm podem ser atribuídas aos defeitos e Estado de Superfície (ES), referindo-se aos grupos funcionais e heteroátomos presentes na estrutura dos PQCM2, tendo em vista os grupos funcionais dos precursores utilizados na síntese (GAO *et al.*, 2020a; YAO *et al.*, 2019; ZHAO *et al.*, 2019).

Figura 13 – Espectros de absorção, excitação (linhas tracejadas) e emissão (linhas contínuas) da suspensão aquosa de PQCM2 $0,01 \text{ mg mL}^{-1}$. Inserção: fotos da amostra vista sob luz branca, excitações de 340, 450 e 550 nm, da esquerda para a direita, respectivamente.



Fonte: autora.

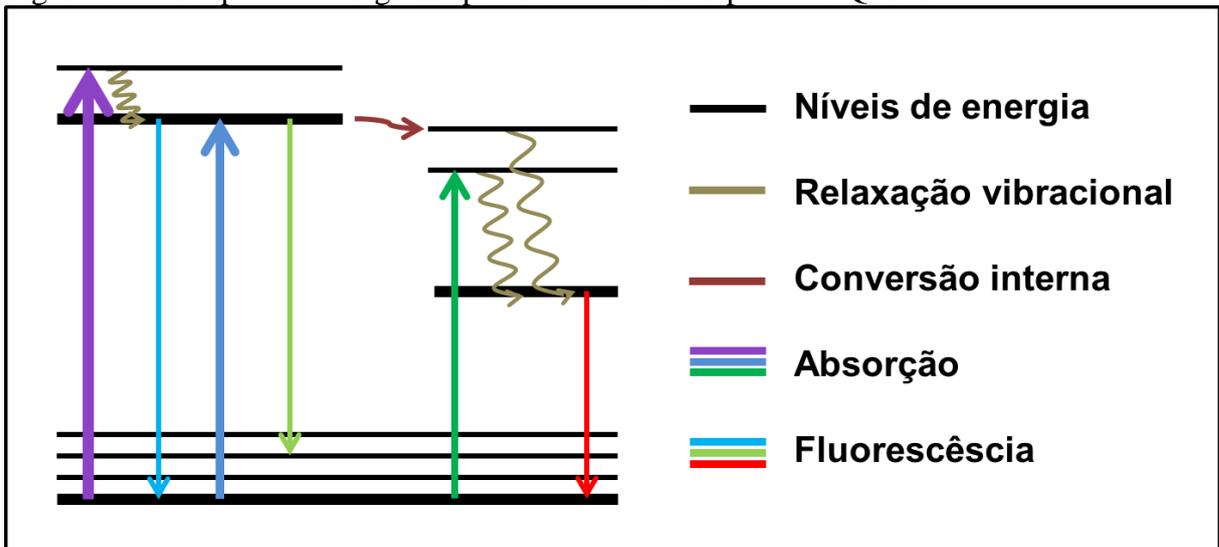
Nos espectros de fluorescência dos PQCM2 em três diferentes comprimentos de onda de excitação ($\lambda_{exc} = 340, 450$ e 550 nm) mostraram bandas de emissão em $450, 550$ e 600 nm , respectivamente. Esses resultados indicam que a emissão é dependente do λ_{exc} e há uma mistura de PQC e moléculas fluorescentes na amostra de PQCM2. Para confirmar essa

observação, os espectros de excitação foram obtidos a partir dos comprimentos de onda de emissão ($\lambda_{em} = 450, 550$ e 600 nm). Nos dois primeiros casos, observa-se que as bandas de excitação (em torno de 350 e 450 nm, respectivamente) são imagens espaciais das bandas de emissão. Isso indica que grupos fluoróforos específicos dos PQCM2, como ligações duplas C=C e C=O, absorvem e emitem fótons nesses comprimentos de onda.

No espectro de excitação do monitoramento do λ_{em} em 600 nm foram observadas bandas com máximos em aproximadamente $450, 520$ e 550 nm. Isso significa que, na suspensão de PQCM2, os fótons da região laranja do espectro eletromagnético são emitidos pela absorção desses três diferentes comprimentos de onda devido aos grupos funcionais na superfície, heteroátomos no núcleo grafítico e maior tamanho das nanopartícula, onde tais estruturas foram investigadas nas caracterizações a serem discutidas nessa seção, como FTIR, Raman e XPS (HOLÁ *et al.*, 2017; ZHENG *et al.*, 2021). Essa característica reflete a vantagem dos PQCM2 emitirem fótons em torno de 600 nm a partir de excitação em diferentes comprimentos de onda, favorecendo a obtenção de um dispositivo emissor de luz branca.

Pela teoria de semicondutores, a dopagem de elementos químicos que tenham bandas próximas em energia da banda de condução e mais elétrons do que o semicondutor intrínseco (elemento químico puro) gera semicondutor do tipo n. Se a dopagem ocorre com elementos que possuem bandas próximas em energia da banda de valência e menos elétrons do que o hospedeiro, o semicondutor é do tipo p (MIESSLER; FISCHER; TARR, 2014). Levando em consideração que os PQCM produzidos neste trabalho são a base de carbono, com nitrogênio e oxigênio, estes em menores proporções, infere-se que há formação de bandas similar ao que acontece com um semicondutor do tipo n. O Diagrama de Jablonski (LAKOWICZ, 2006; YUAN *et al.*, 2019b; ZHAO *et al.*, 2019), mostrado na Figura 14, representa a proposta para as possíveis transições eletrônicas entre os níveis de energia dos PQCM2 de modo simplificado, levando em conta os espectros de absorção, excitação e emissão da Figura 13.

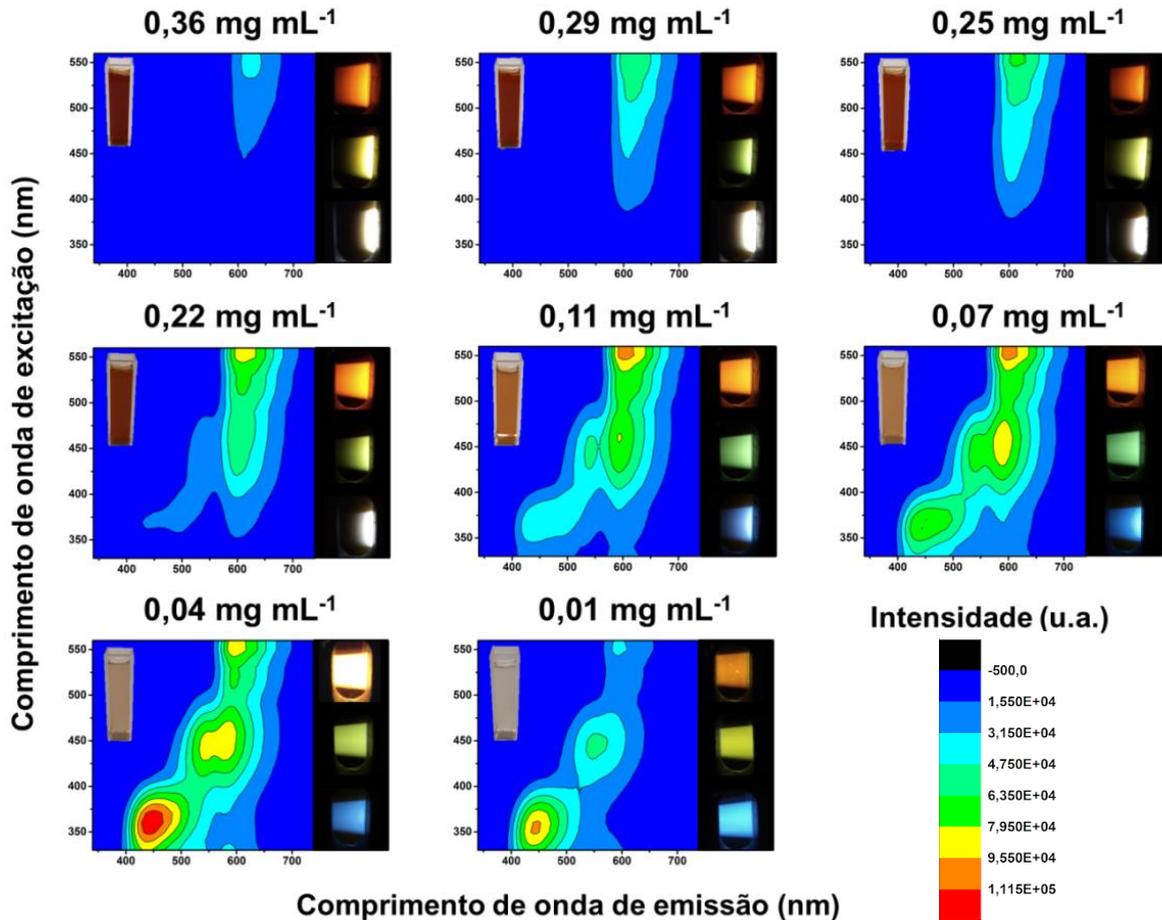
Figura 14 – Proposta de diagrama parcial de Jablonski para os PQCM2.



Fonte: autora.

Espectros de fluorescência em diversas concentrações e fontes de excitações foram obtidos e apresentados na Figura 15. Nota-se que, à medida que se aumenta a concentração de PQCM2, a região de maior intensidade de emissão é deslocada para a região do vermelho e uma consequente redução da intensidade de emissão na região laranja a partir da concentração de $0,11 \text{ mg mL}^{-1}$ é observada. Isso ocorre por causa da supressão de fluorescência induzida por agregação nas amostras mais concentradas (ZHANG *et al.*, 2019). O aumento da emissão de fótons na região do laranja, quando os PQCM2 estão em maiores concentrações, deve-se à aglomeração das nanopartículas, causando alta densidade óptica. Nesse efeito, também chamado de efeito de filtro interno secundário, verifica-se uma reabsorção de parte do menor comprimento de onda de emissão. Este fator é confirmado pela sobreposição dos espectros de absorção e emissão mostrados na Figura 13 (LAKOWICZ, 2006).

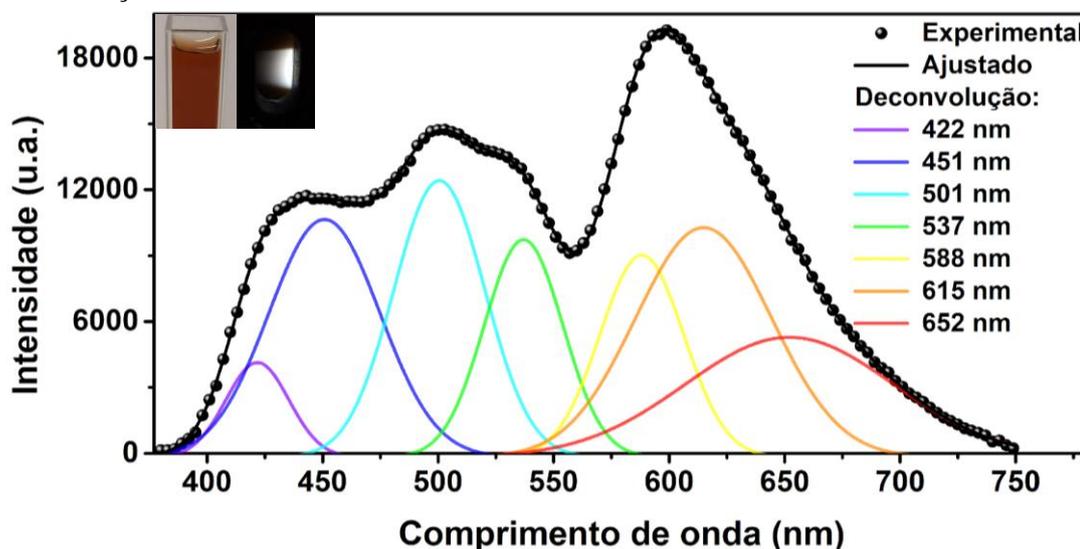
Figura 15 – Espectros de Fotoluminescência em formato bidimensional das suspensões de PQCM2 em diferentes concentrações e fontes de excitação. Inserido: amostras sob luz branca. Ao lado: amostras sob fontes de excitação de 550, 450 e 340 nm, respectivamente de cima para baixo.



Fonte: autora.

Além disso, a fotoluminescência dos PQCM2 é dependente da fonte de excitação quando estão mais diluídos, sofrendo também o efeito batocrômico à medida que se aumenta o λ_{exc} . Como resultado, no espectro de $0,22 \text{ mg mL}^{-1}$ e excitação de 380 nm, são encontradas bandas de emissão localizadas em toda a região do visível, como pode ser visto na Figura 16. Portanto, verificamos que a síntese dos PQCM2 produzidos neste trabalho resultou em fluoróforos de emissão em quase toda a região do visível, dependendo da fonte de excitação e da concentração da amostra e que a utilização dos PQCM2, excitado por um *LED* ultravioleta de 380 nm, pode resultar em um *LED* branco (*WLED*) puro, bastante almejado pelas indústrias de iluminação.

Figura 16 – Deconvolução do espectro de fotoluminescência dos PQCM2 0,22 mg mL⁻¹ em excitação de 380 nm. Inserção: suspensão da amostra sob luz branca e fonte de excitação de 380 nm.



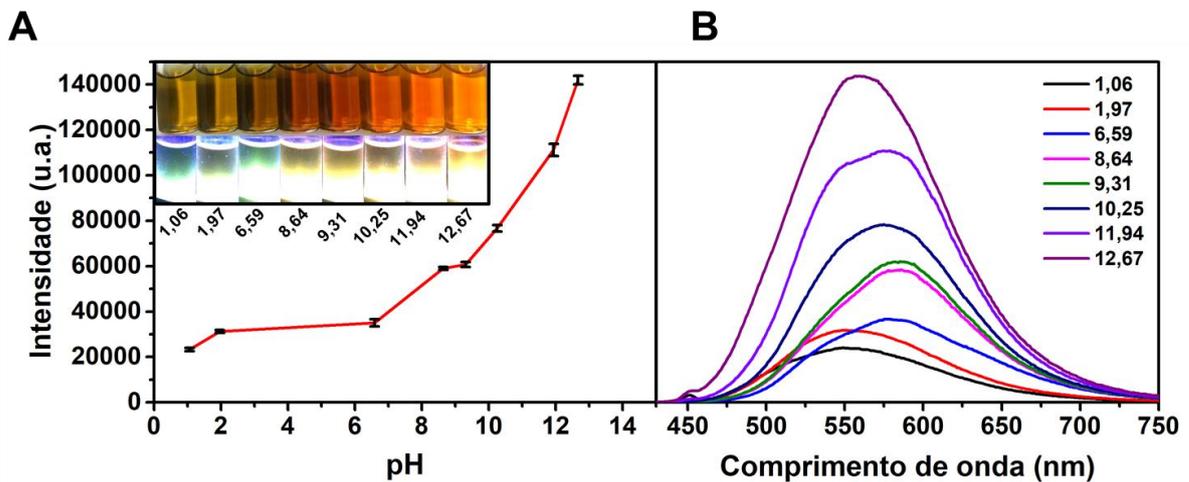
Fonte: autora.

O RQ para o PQCM2 foi de $14,68 \pm 0,72\%$, próximo ao valor de RQ dos pontos de carbono hidrofílicos produzidos a partir de azul de metileno, ácido sulfúrico e etanol, de 16,5% (GAO *et al.*, 2019). Porém, superior aos valores de RQ de PC obtidos a partir de uma mistura de arginina, etilenodiamina, dianidrido 1,4,5,8-naftalenotetracarboxílico e 2,6-Dibromonaftaleno-1,4,5,8-tetracarboxílico dianidrido, o qual foi de 8% (ARCUDI; ĐORĐEVIĆ; PRATO, 2017), e poli(cloreto de dialildimetilamônio) em água, o qual foi de no máximo 11% (MADHU; CHEN; TSENG, 2019). Essas sínteses, que podem ser encontradas no estado da arte, têm por objetivo produzir PC brancos para a confecção de *WLED*, semelhante à proposta deste trabalho. Além disso, neste trabalho uma síntese em uma única etapa é proposta, sem a necessidade de purificação, visando redução de custos para as indústrias de iluminação.

O comportamento espectral dos PQCM2 em soluções ácidas e básicas está demonstrado na Figura 17. Os gráficos mostram que em soluções ácidas a máxima intensidade de fluorescência (λ_{exc} de 450 nm e λ_{em} próximo de 550 nm) foi mais baixa do que em soluções básicas (λ_{exc} de 450 nm e λ_{em} em torno de 560 nm). No meio ácido, esse desempenho pode ser explicado devido à protonação de grupos funcionais (C-O ou C-N) presentes nos PQCM2 que favorece a agregação das nanopartículas (ZHANG *et al.*, 2020b). No meio alcalino, a fotoluminescência é aumentada devido à efetiva separação dos pares de elétron-buraco na estrutura de bandas dos PQCM2, causada pelo aumento de grupos

funcionais oxidados na superfície das nanopartículas (HAN *et al.*, 2020; LEI; HSIEH; LIU, 2019).

Figura 17 – Fonte de excitação de 450 nm com a mudança de pH das suspensões de PQCM2 0,22 mg mL⁻¹. (A) Intensidades máximas de emissão em triplicata e (B) espectros de emissão. Inserção: amostras sob luz branca (acima) e luz 434 nm (abaixo).



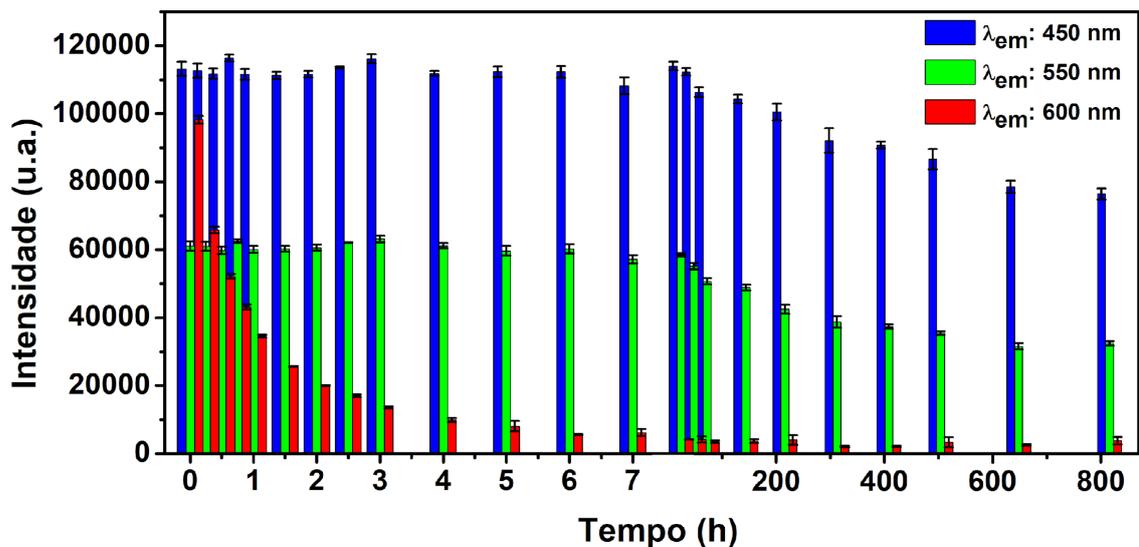
Fonte: autora.

Nas suspensões de pH entre 6 e 11, ocorre o efeito batocrômico, deslocando a intensidade máxima de emissão para o λ_{em} em torno de 575 nm, e, na suspensão com pH 12, o λ_{em} recua para próximo de 560 nm. Esse fenômeno ocorre devido a influência da oxidação química dos grupos C-O e C-N nas transições eletrônicas n- π^* e transições referentes ao estado de superfície (MONDAL; SAHA, 2019). O potencial zeta ratifica a presença de grupamentos de caráter aniônico, visto que o valor obtido nessa análise foi de -18,6 mV, revelando a presença de carga negativa na superfície dos PQCM2. Logo, verifica-se que o meio tem influência significativa sobre a fotoluminescência dessas nanopartículas, podendo ser um aliado para o aumento da intensidade de emissão e aumento da qualidade do LED.

A fluorescência da suspensão aquosa dos PQCM2 0,01 mg mL⁻¹ em relação ao tempo de estoque da amostra também foi investigada conforme mostrado na Figura 18. Houve uma redução excessiva da intensidade de emissão no λ_{em} de 600 nm excitada por comprimento de onda de 550 nm nas primeiras 6 horas, enquanto que nas emissões em torno de 450 e 550 nm com excitações em 340 e 450 nm, respectivamente, a redução foi mais tênue. Esse desempenho pode ter sido ocasionado devido à agregação das nanopartículas, resultando no efeito de supressão da fluorescência causada por agregação (ZHANG *et al.*, 2019). Tais partículas absorvem completamente a luz, reduzindo a sua fluorescência, ou seja, sobretudo a

emissão vermelha. Além disso, mesmo a olho nu, foi possível observar o escurecimento da suspensão e a formação de precipitado visto sob a luz branca ao longo do tempo. Portanto, é evidente que é necessário a rápida incorporação em matriz sólida dos PQCM2 logo após a sua síntese para que se mantenha o máximo de desempenho da sua propriedade fotoluminescente.

Figura 18 – Intensidades de emissão em relação ao tempo de estoque da suspensão aquosa de PQCM2 $0,01 \text{ mg mL}^{-1}$ em triplicata. Excitações em 340, 450 e 550 nm e emissões em torno de 450, 550 e 600 nm, respectivamente.



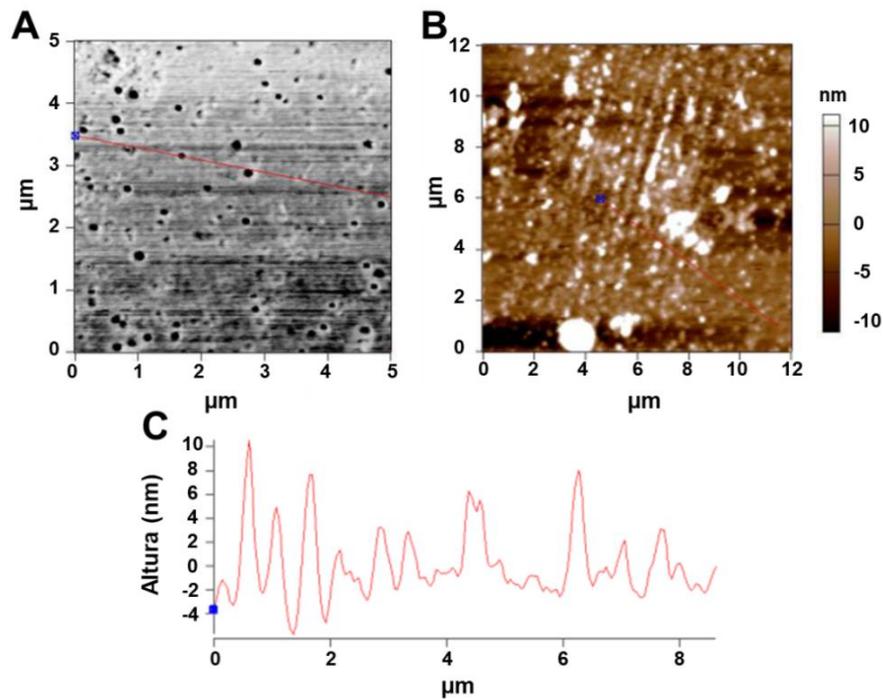
Fonte: autora.

A morfologia e a dimensão estimada dos PQCM2 foram verificadas mediante análise de *AFM*, conforme mostrado na Figura 19. A mistura de PQCM2 apresentou uma grande concentração de nanopartículas esféricas isoladas e pequenos aglomerados, confirmando a agregação que causou a redução da quantidade de emissão. Na Figura 19A, observa-se a presença de contraste de cor nas posições associadas às nanopartículas. O contraste de fases da imagem é indicativo de uma mudança na composição do material, em que se observa um núcleo, de coloração escura, e a possível presença de grupos funcionais na superfície das nanopartículas, estes associados à fase circundante, de coloração mais clara (GOURIANOVA; FUHRMANN, 2004).

Uma varredura de cerca de $8 \mu\text{m}$ na micrografia da Figura 19B revelou uma variação na altura topográfica entre 4 e 12 nm da amostra de PQCM2 (FIGURA 19C). Em estudos anteriores, PQCM foram relatados com tamanhos de até 8 nm (CARNEIRO CRUZ *et al.*, 2019; FENG *et al.*, 2018; SHAO *et al.*, 2017). Ou seja, a partir das imagens de *AFM* é indicado que as nanopartículas presentes na amostra PQCM2 possuem tamanhos

heterogêneos e podem facilmente agregar. Essa observação pode estar em consonância com o Efeito de Confinamento Quântico (ECQ) relatado por alguns autores (FIGURA 19B, C) (GAO *et al.*, 2020b; HU *et al.*, 2019; WANG *et al.*, 2017b).

Figura 19 – Micrografias de Força Atômica dos PQCM2 (A) de fase, (B) de altura e (C) varredura da altura topográfica da micrografia B.

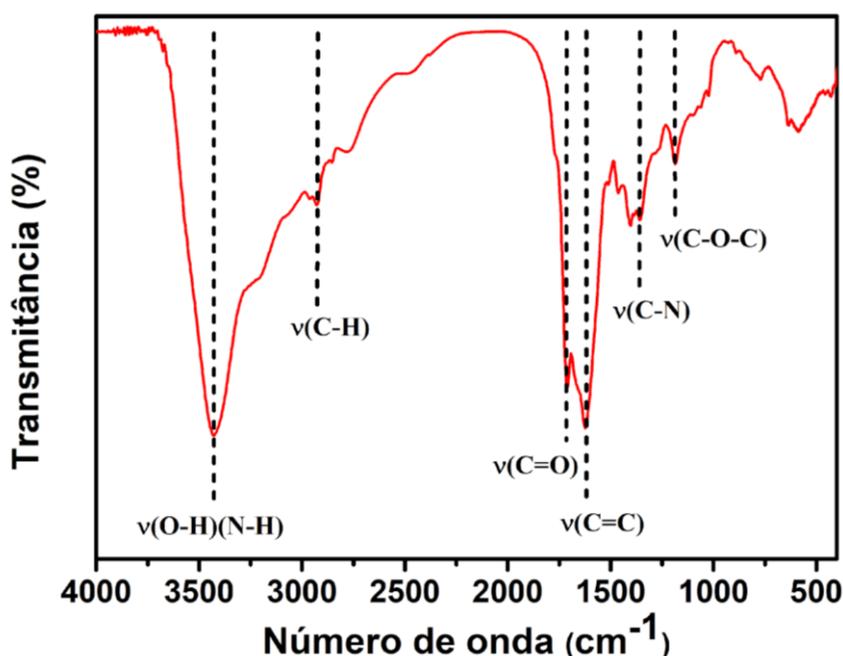


Fonte: autora.

O ECQ é uma das justificativas para emissões de luz de PQC em diferentes comprimentos de onda. Quanto maior for o PQC, maior será a quantidade de domínios π conjugados e menor será o gap de energia. Esse fenômeno ocorre porque os elétrons disponíveis nas ligações duplas entre os carbonos no núcleo das nanopartículas geram transições eletrônicas em diferentes comprimentos de onda, quando excitados por fótons. Além disso, os heteroátomos que possuem pares de elétrons não ligados influenciam a formação de armadilhas de elétrons entre os orbitais LUMO e HOMO. Esse fenômeno reduz a lacuna de energia, resultando em transições eletrônicas de comprimento de onda mais longo. Portanto, a diversidade de tamanhos dos PQCM2, observada na AFM, e as ligações C=O, C=N, C-O e C-N (defeitos e ES), observados na espectroscopia de UV-Vis, resultam em emissão ao longo de toda a região visível, do azul ao vermelho (CHERNYAK *et al.*, 2020; GAO *et al.*, 2020b; HE *et al.*, 2020; HU *et al.*, 2019; WANG *et al.*, 2017b).

A composição dos PQCM2 pôde ser analisada por meio da espectroscopia *FTIR*, apresentada na Figura 20. Foi possível observar uma banda larga em 3429 cm^{-1} com um ombro em 3237 cm^{-1} que foi atribuída aos respectivos estiramentos vibracionais O-H e N-H. A banda em 1620 cm^{-1} com um ombro em 1658 cm^{-1} refere-se aos estiramentos vibracionais das duplas ligações C=C e C=N, respectivamente (CHEN *et al.*, 2017; GAO *et al.*, 2020a). A banda em 1717 cm^{-1} foi atribuída à absorção vibracional C=O, e as bandas em 1187 e 1022 cm^{-1} aos dois estiramentos vibracionais de C-O-C (ZHANG *et al.*, 2019). Há ainda uma banda em 1359 cm^{-1} atribuída ao estiramento vibracional da ligação C-N e outra banda em 2926 cm^{-1} ao estiramento vibracional C-H (GAO *et al.*, 2020a; WANG *et al.*, 2020a). Os estiramentos vibracionais observados no espectro de *FTIR* sugerem estruturas poliaromáticas além de grupos funcionais presentes na superfície das nanopartículas. A Tabela 2 resume as atribuições das bandas.

Figura 20 – Espectro de *FTIR* dos PQCM2.



Fonte: autora.

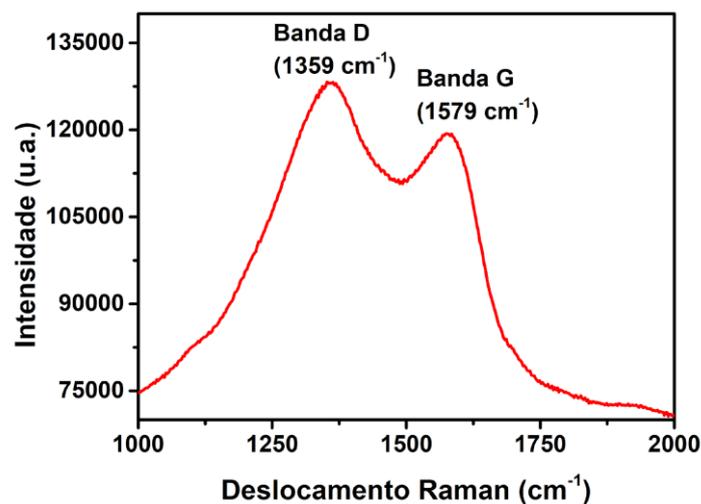
Tabela 2 – Bandas de vibração e suas respectivas atribuições para PQCM2.

Banda (cm^{-1})	Atribuição	Referência
3429; 3237; 1620; 1658	O-H; N-H; C=C; C=N	CHEN <i>et al.</i> , 2017; GAO <i>et al.</i> , 2020a
2926	C-H	WANG <i>et al.</i> , 2020a
1717; 1187 e 1022	C=O; C-O-C	ZHANG <i>et al.</i> , 2019
1359	C-N	GAO <i>et al.</i> , 2020a

Fonte: elaborada pela autora.

O espectro Raman dos PQCM2 está apresentado na Figura 21. Duas bandas largas típicas bem definidas foram observadas em 1359 e 1579 cm^{-1} , atribuídas às bandas D e G, respectivamente. A banda G corresponde à estrutura de carbonos sp^2 e a banda D é associada aos carbonos sp^3 , isto é, à presença de defeitos de superfície (WANG *et al.*, 2017b). A razão I_D/I_G é igual a 1,07, confirmando, portanto, que os PQCM2 possuem estrutura grafítica com inúmeros defeitos de superfície em uma proporção similar (GAO *et al.*, 2019; MADHU; CHEN; TSENG, 2019).

Figura 21 – Espectro Raman dos PQCM2.



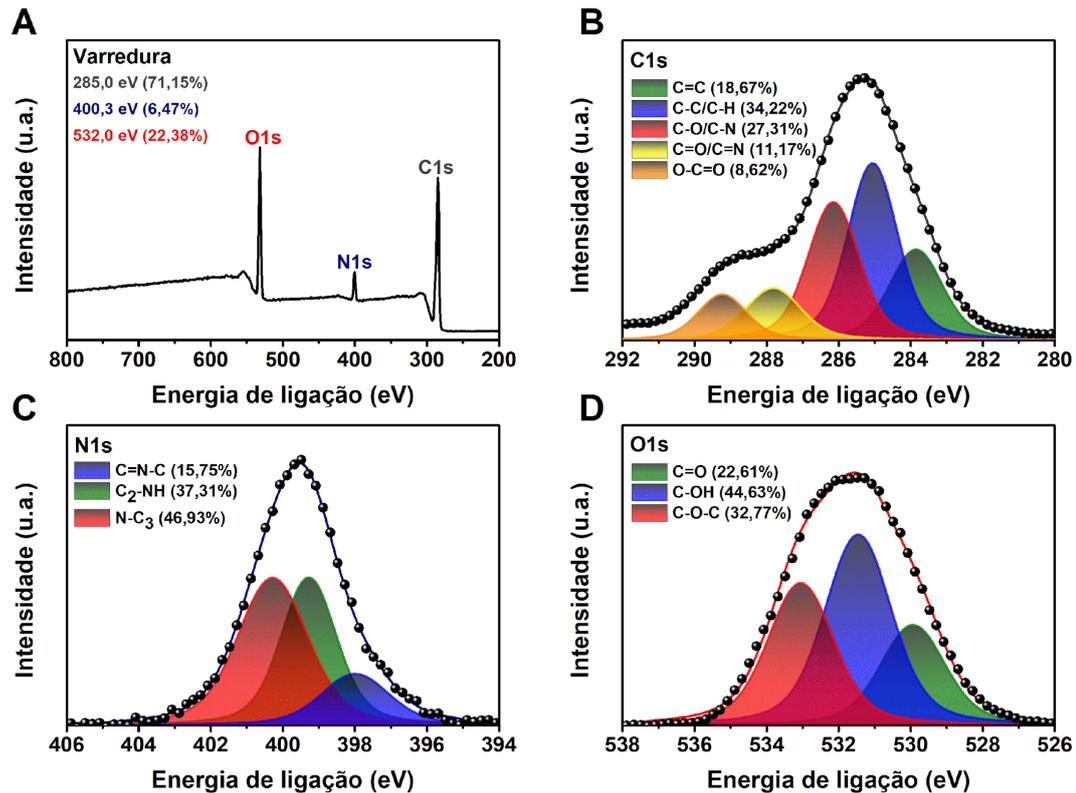
Fonte: autora.

Os espectros de XPS, mostrados na Figura 22, confirmam os grupos químicos funcionais presentes na superfície e no núcleo dos PQCM2. Verificou-se o carbono como principal elemento em relação aos demais com 71,15% de átomos e funcionalização com os grupos de oxigênio e nitrogênio com percentuais de átomos de 22,38 e 6,47%, respectivamente. No espectro de varredura (FIGURA 22A) foi possível observar três sinais em 285, 400,3 e 532,0 eV correspondentes aos elementos C, N e O, respectivamente. A deconvolução do espectro C1s apresentou cinco bandas, as quais estão localizadas em 283,8; 285,0; 286,1; 287,8 e 289,2 eV e que podem ser associadas às ligações C=C (sp^2), C-C/C-H (sp^3), C-O/C-N, C=O/C=N e O-C=O, respectivamente (FIGURA 22B) (ARCUDI; ĐORĐEVIĆ; PRATO, 2017; DING *et al.*, 2016).

Verifica-se que a quantidade de carbonos com hibridização sp^3 (34,22%) é maior do que a de carbonos sp^2 hibridizados (18,67%), indicando a presença de defeitos de superfície e corroborando com a espectroscopia Raman. O espectro de alta resolução do N1s deconvoluído apresentou três bandas em 398,0; 399,3 e 400,3 eV, podendo ser atribuídas aos

nitrogênios piridínico (C=N-C), pirrólico (C₂-NH) e grafítico (N-C₃), respectivamente (FIGURA 22C). A deconvolução do espectro de alta resolução do O1s também apresentou três bandas em 530,0; 531,5 e 533,0 eV, que podem ser referentes às ligações C=O, C-OH e C-O-C, respectivamente (FIGURA 22D) (SUN *et al.*, 2020).

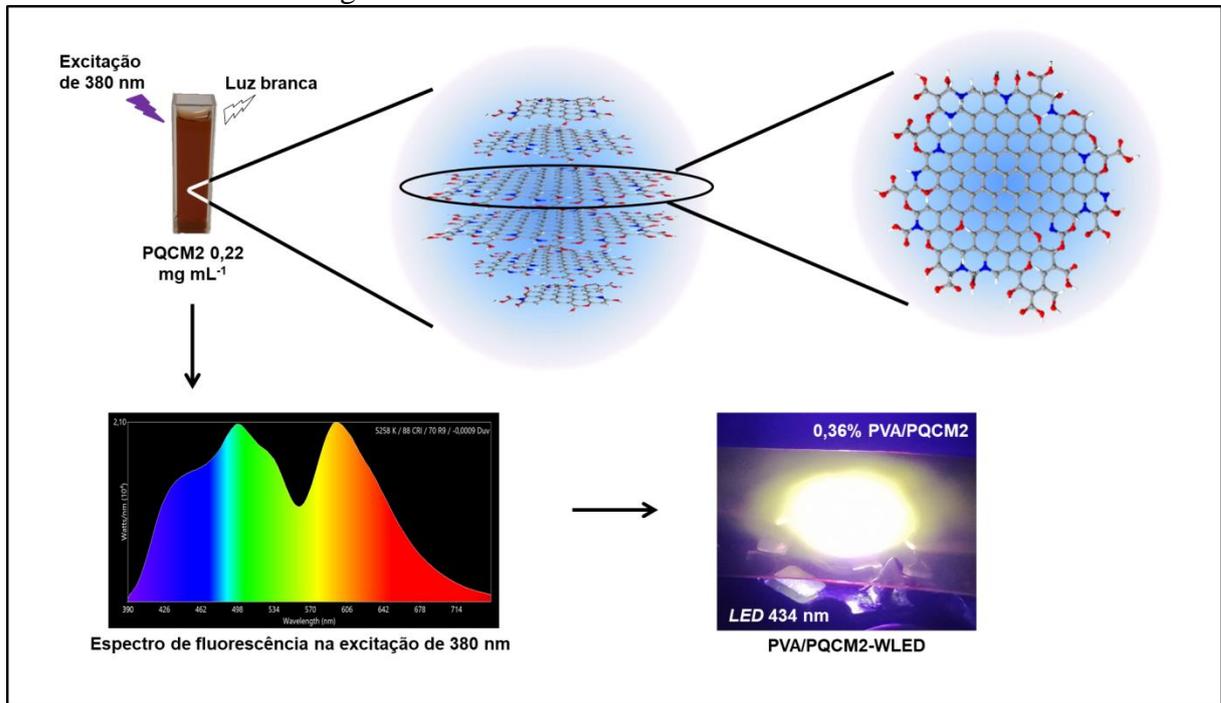
Figura 22 – Espectros de XPS dos PQCM2 e suas deconvoluções: (A) varredura, (B) C1s, (C) N1s, (D) O1s.



Fonte: autora.

Portanto, por meio de reações de condensação e carbonização (CHEN *et al.*, 2016), os precursores (ácido cítrico, ureia e DMF) formaram estruturas grafíticas e quase esféricas com defeitos e estados de superfície, conforme verificado pelas análises discutidas e mostradas na estrutura proposta da Figura 23. Ademais, foi possível verificar as propriedades fotoluminescentes provenientes da hibridização entre os domínios π conjugados e dos grupos nitrogenados e oxigenados, conforme visto nas caracterizações ópticas, e a influência desses grupos funcionais com a mudança de pH. Por fim, os PQCM2 foram incorporados em matriz polimérica a fim de se obter um *WLED*.

Figura 23 – Esquema geral de aplicação dos PQCM2 incorporados em PVA sob diodo emissor de luz azul e evidência de estrutura proposta para os PQCM em formato quase-esférico e uma das folhas gráficas.



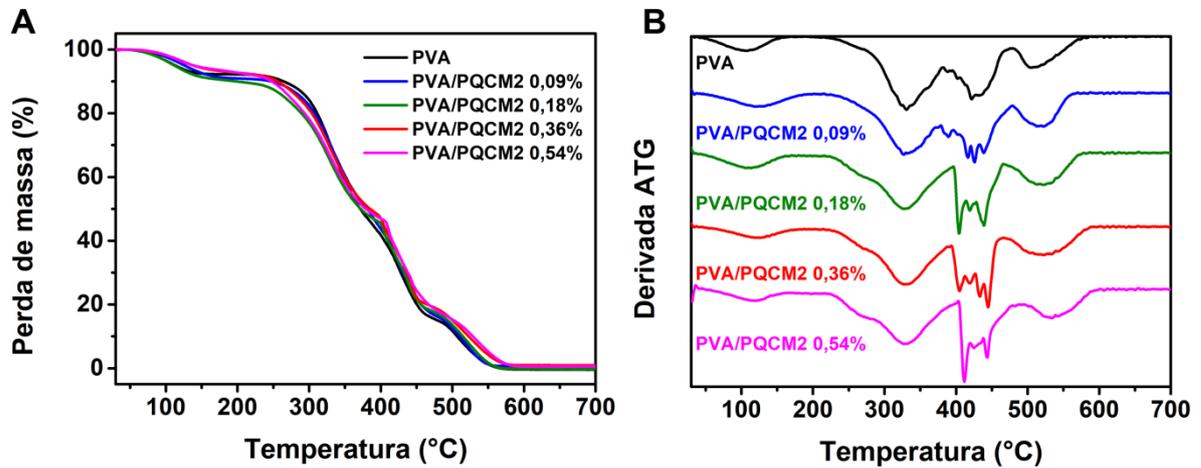
Fonte: autora.

5.2 Caracterização térmica dos compostos PVA/PQCM2 e luminescente do PVA/PQCM2-WLED

A estabilidade térmica dos filmes fotoluminescentes foi avaliada pela Análise Termogravimétrica (ATG) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC). Em geral, todas as curvas mostram que há mudança pouco perceptível na estabilidade térmica e perfil de degradação entre os filmes PVA e PVA/PQCM2 em diferentes concentrações. Nos termogramas da ATG e de suas derivadas (DTG) foi possível identificar o número de eventos térmicos, bem como a perda de massa, envolvidos durante o processo de degradação (FIGURA 24).

As amostras apresentaram perda de massa de 5,1 a 8,7% em temperaturas de até no máximo 181,6 °C referente à perda de moléculas de água fisissorvidas ou quimissorvidas, interagindo por ligações de hidrogênio com o PVA. É possível observar mais três eventos térmicos entre as temperaturas de 223,7 a 593,0 °C com perdas de massas entre 91,5 e 94,7% entre os filmes analisados e atribuídos à decomposição da estrutura polimérica e desintegração do resíduo sólido (CHIKH *et al.*, 2017; RANI; AHAMED; DESHMUKH, 2020).

Figura 24 – Termogramas (A) ATG e (B) DTG dos filmes PVA e PVA/PQCM2 em diferentes concentrações.



Fonte: autora.

Considerando as temperaturas iniciais e as perdas de massa dos eventos térmicos apresentadas na Tabela 3, é possível inferir que há um pequeno aumento da temperatura inicial de decomposição térmica dos compósitos fotoluminescentes PVA/PQCM2 a partir de 0,18% em relação ao filme PVA. Logo, PQCM2 ou APTES utilizados no preparo dos compósitos causou um pequeno aumento na estabilidade térmica do PVA. Porém, no terceiro evento térmico (378,4-478,2 °C), identifica-se uma variação na DTG dos filmes com maiores concentrações. Essa disparidade deve-se à provável interação entre APTES e PVA, visto que a degradação de compósitos de PC encontrados na literatura incorporados em PVA é pouco perceptível na ATG. Além disso, APTES pode reticular com PVA, resultando no aumento da estabilidade térmica (KURT; SAHINER, 2021; PATIL *et al.*, 2020; XIA; LI; WANG, 2016).

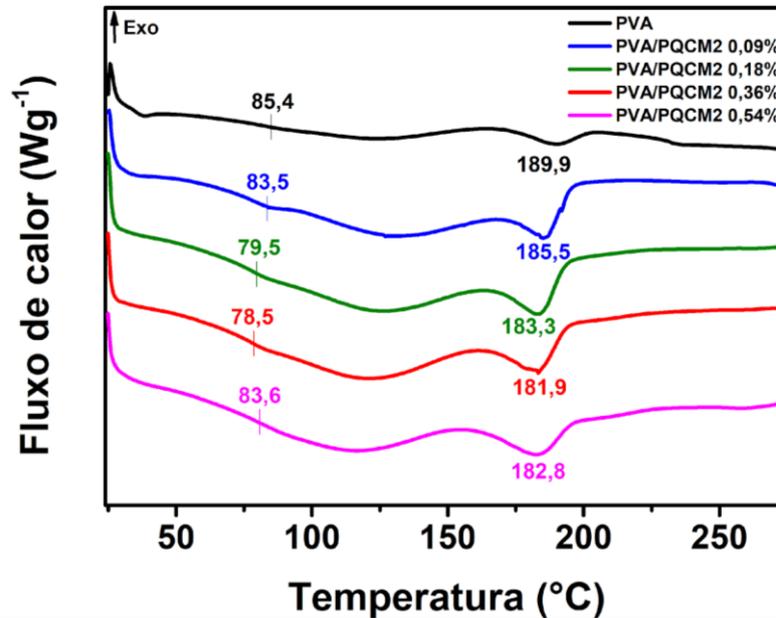
Tabela 3 – Temperatura inicial e perda de massa dos eventos térmicos da análise termogravimétrica dos compósitos PVA/PQCM2.

Amostra	1º evento		2º evento		3º evento		4º evento	
	T inicial (°C)	Perda de massa (%)	T inicial (°C)	Perda de massa (%)	T inicial (°C)	Perda de massa (%)	T inicial (°C)	Perda de massa (%)
PVA	46,4	8,7	223,7	45,0	381,7	29,2	436,6	17,3
PVA/PQCM2 0,09%	54,2	7,6	223,7	40,0	378,4	36,0	469,8	15,7
PVA/PQCM2 0,18%	48,0	7,2	227,0	46,1	395,1	28,6	470,3	16,8
PVA/PQCM2 0,36%	48,0	5,9	232,0	45,5	390,1	28,2	456,4	19,3
PVA/PQCM2 0,54%	49,5	5,1	227,0	49,0	403,4	28,2	480,0	17,5

Fonte: elaborada pela autora.

Nos termogramas de *DSC*, mostrados na Figura 25, foi possível identificar as temperaturas de transição vítrea (T_v) em 85,5, 83,5, 79,5, 78,5 e 83,6 °C para PVA e compósitos PVA/PQCM2 0,09, 0,18, 0,36 e 0,54%, respectivamente. A gradual redução da T_v com o aumento de PQCM2 indica uma quebra na estrutura polimérica do PVA ao incorporar as nanopartículas, gerando uma livre movimentação das cadeias mais curtas de PVA. Porém, no filme de maior concentração (PVA/PQCM2 0,54%), houve um aumento da T_v que pode ter sido ocasionada pela considerável agregação dos PQCM2, resultando na diminuição da interação entre as nanopartículas e a matriz polimérica, devido à redução da área superficial das nanopartículas agregadas.

Figura 25 – Termogramas DSC dos filmes PVA e PVA/PQCM2 em diferentes concentrações.

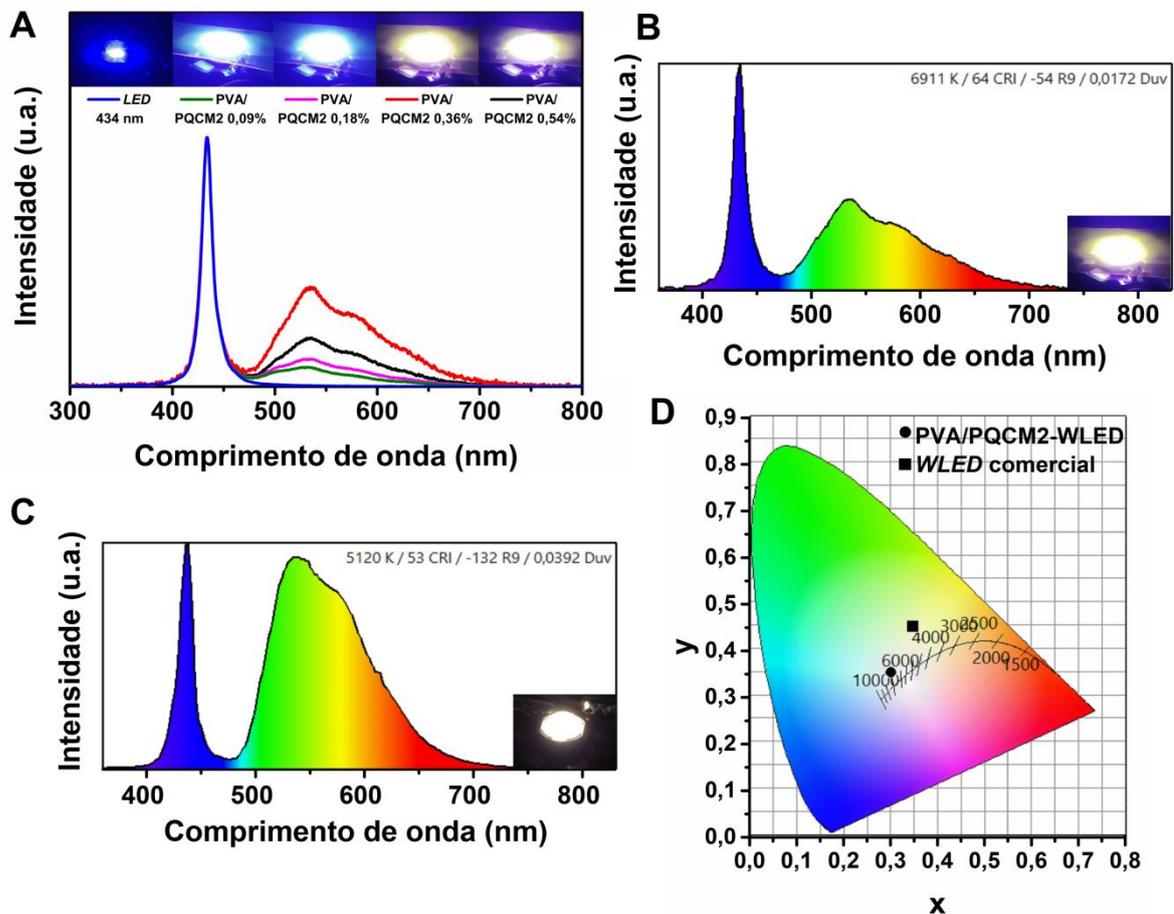


Fonte: autora.

Um segundo evento térmico foi observado com característica endotérmica, podendo ser atribuído à temperatura de fusão (T_f) em 189,9, 185,5, 183,3, 181,9 e 182,8 °C para os filmes PVA e PVA/PQCM2 0,09, 0,18, 0,36 e 0,54%, respectivamente. Assim como na T_v , há redução da T_f com o aumento da concentração de PQCM2, ocasionado pelo aumento da conformação polimérica quase aleatória em torno dos PQCM e consequente aumento da flexibilidade dos compósitos (HU *et al.*, 2016). Portanto, essas mudanças da T_v interferem na aplicação proposta neste trabalho com redução da durabilidade do dispositivo, uma vez que o LED pode atingir uma temperatura de até 120 °C (TONG *et al.*, 2019) e as T_v dos compósitos PVA/PQCM2 são inferiores (HINOV; TSANKOV; IBRISHIMOV, 2019). Assim, é necessário utilizar outra matriz polimérica com uma T_v superior a 120 °C para aplicações industriais, como o policarbonato (SOHEL *et al.*, 2021).

A Figura 26A apresenta os espectros de luminescência, normalizados de acordo com a fonte de excitação, dos diferentes filmes preparados, excitados por um LED azul comercial. Observa-se que há um aumento da intensidade de emissão na região entre 477 e 700 nm à medida que se aumenta a concentração de PQCM2 no filme. No entanto, há um declínio dessa intensidade na concentração de 0,54%. Levando em conta a propriedade de agregação dos PQCM2 observada, o aumento acentuado da concentração ocasiona a agregação das nanopartículas e uma menor emissão de luz, reduzindo a propriedade fotoluminescente.

Figura 26 – Propriedade fotoluminescente dos filmes PVA/PQCM2. Espectros de luminescência (A) do *LED* azul e dos PVA/PQCM2 excitados por *LED* azul em diferentes concentrações. Espectros coloridos de luminescência (B) do PVA/PQCM2-WLED (concentração de PVA/PQCM2 0,36%) e (C) do *WLED* comercial. (D) Diagrama de cromaticidade do PVA/PQCM2-WLED e do *WLED* comercial. Inserido: fotografias dos *LED* de cada espectro mostrado.



Fonte: autora.

Na comparação do Índice de Renderização de Cor (*CRI*), que indica a capacidade de reproduzir as cores com precisão, do PVA/PQCM2-WLED (*CRI* de 64) e de um *WLED* comercial (*CRI* de 53) analisado nas mesmas condições, verificou-se que o PVA/PQCM2 0,36% proporciona uma melhor qualidade de cor ao *WLED* (FIGURA 26B,C). A partir das coordenadas de cromaticidade da *Commission Internationale de L'Eclairage* (*CIE*) 1931 mostradas na Figura 26D, é possível inferir que o PVA/PQCM2-WLED proposto nesse trabalho, que se encontra no ponto (0,30; 0,35), está mais próximo da luz branca pura (0,33; 0,33) do que o *WLED* comercial (0,35; 0,44).

O valor de *CIE* obtido neste trabalho foi semelhante ao de Song e colaboradores (2019) que obtiveram luz branca (0,35, 0,30) de uma mistura de fluoróforos de estado sólido

com base em PQC obtidos a partir de ácido cítrico e ureia. Por outro lado, usamos os mesmos precursores de seus PQC com emissão vermelha para obter tal dispositivo. Isso revela que é possível eliminar as etapas de purificação e preparação para reduzir custos. Portanto, esses resultados demonstram aplicações potenciais dos PQCM2 para a produção em larga escala de dispositivos de iluminação branca. No entanto, mais estudos são necessários para resolver os efeitos da supressão de fluorescência para aumentar a eficiência da iluminação.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A variação de tempo e temperatura na síntese solvotermal dos PQCM, provenientes de ácido cítrico, ureia e dimetilformamida, resultou em nanopartículas com diferentes grupos químicos estruturais, evidenciada pela emissão em toda a região do visível do espectro eletromagnético. Os PQCM2 (11h e 24 min e 166 °C) foram caracterizados conforme as propriedades morfológicas e estruturais dos PQC e selecionados com melhores parâmetros fotoluminescentes para a incorporação em filmes poliméricos. Foi possível observar a ocorrência do estado de superfície e defeitos de superfície nos PQCM2, por meio de estudo óptico e caracterização estrutural. Além disso, também houve uma alta densidade óptica ao variar a concentração das nanopartículas. O RQ dos PQCM2 foi de 14,7%, comparável com o estado da arte, porém a síntese é mais acessível devido ao baixo custo de produção. Os PQCM2 incorporados no *PVA* e aplicado no *LED* azul provou ter uma maior capacidade de reproduzir cores próximas à realidade quando comparado a um *WLED* comercial, portanto esses nanomateriais têm capacidade de fornecer um alto padrão de qualidade ao *WLED*, sem gerar resíduos tóxicos e com baixo custo de produção.

REFERÊNCIAS

- ARCUDI, Francesca; ĐORĐEVIĆ, Luka; PRATO, Maurizio. Design, Synthesis, and Functionalization Strategies of Tailored Carbon Nanodots. **Accounts of Chemical Research**, [S. l.], v. 52, n. 8, p. 2070–2079, 2019.
- ARCUDI, Francesca; ĐORĐEVIĆ, Luka; PRATO, Maurizio. Rationally Designed Carbon Nanodots towards Pure White-Light Emission. **Angewandte Chemie**, [S. l.], v. 129, n. 15, p. 4234–4237, 2017.
- ASHRAFIZADEH, Milad; MOHAMMADINEJAD, Reza; KAILASA, Suresh Kumar; AHMADI, Zahra; AFSHAR, Elham Ghasemipour; PARDAKHTY, Abbas. Carbon dots as versatile nanoarchitectures for the treatment of neurological disorders and their theranostic applications: A review. **Advances in Colloid and Interface Science**, [S. l.], v. 278, p. 1–12, 2020.
- CAI, Wei; ZHANG, Ting; XU, Meng; ZHANG, Miaoran; GUO, Yongjian; ZHANG, Lipeng; STREET, Jason; ONG, Wee Jun; XU, Quan. Full color carbon dots through surface engineering for constructing white light-emitting diodes. **Journal of Materials Chemistry C**, [S. l.], v. 7, n. 8, p. 2212–2218, 2019.
- CAO, Fan; WANG, Sheng; WANG, Feijiu; WU, Qianqian; ZHAO, Dewei; YANG, Xuyong. A Layer-by-Layer Growth Strategy for Large-Size InP/ZnSe/ZnS Core-Shell Quantum Dots Enabling High-Efficiency Light-Emitting Diodes. **Chemistry of Materials**, [S. l.], v. 30, n. 21, p. 8002–8007, 2018.
- CARLIN, N.; SZANTO, E. M.; SEALE, W. A.; JORGE, F. O.; SOUZA, F. A.; BECHTOLD, I. H.; GASQUES, L. R. Birrefringência em placas de onda e atividade óptica de uma solução de açúcar. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [S. l.], v. 27, n. 3, p. 349–355, 2005.
- CARNEIRO CRUZ, Antônio Alvernes; FREIRE, Rafael Melo; FROELICH, Diese Beatiz; ALVES DE LIMA, Ari Clesius; MUNIZ, André Rodrigues; FERREIRA, Odair Pastor; FECHINE, Pierre Basílio Almeida. Fluorescence Based Platform to Discriminate Protein Using Carbon Quantum Dots. **ChemistrySelect**, [S. l.], v. 4, n. 19, p. 5619–5627, 2019.
- CARNEIRO, S. V.; DE QUEIROZ, V. H. R.; CRUZ, A. A. C.; FECHINE, L. M. U. D.; DENARDIN, J. C.; FREIRE, R. M.; DO NASCIMENTO, R. F.; FECHINE, P. B. A. Sensing strategy based on Carbon Quantum Dots obtained from riboflavin for the identification of pesticides. **Sensors and Actuators, B: Chemical**, [S. l.], v. 301, n. August, p. 127149, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.127149>. Acesso em: 21 out. 2019.
- CHA, Wonhee; KIM, Hae Jin; LEE, Songhee; KIM, Jiwon. Size-controllable and stable organometallic halide perovskite quantum dots/polymer films. **Journal of Materials Chemistry C**, [S. l.], v. 5, n. 27, p. 6667–6671, 2017.
- CHAUDHARY, Navneet; GUPTA, Pramod K.; EREMIN, Sergei; SOLANKI, Pratima R. One-step green approach to synthesize highly fluorescent carbon quantum dots from banana juice for selective detection of copper ions. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [S. l.], v. 8, n. 3, p. 103720, 2020. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103720>. Acesso em: 20 set. 2020.

CHEN, Daqin; WU, Weiwei; YUAN, Yongjun; ZHOU, Yang; WAN, Zhongyi; HUANG, Ping. Intense multi-state visible absorption and full-color luminescence of nitrogen-doped carbon quantum dots for blue-light-excitable solid-state-lighting. **Journal of Materials Chemistry C**, [S. l.], v. 4, n. 38, p. 9027–9035, 2016.

CHEN, Jie; WEI, Ji Shi; ZHANG, Peng; NIU, Xiao Qing; ZHAO, Wei; ZHU, Ze Yang; DING, Hui; XIONG, Huan Ming. Red-Emissive Carbon Dots for Fingerprints Detection by Spray Method: Coffee Ring Effect and Unquenched Fluorescence in Drying Process. **ACS Applied Materials and Interfaces**, [S. l.], v. 9, n. 22, p. 18429–18433, 2017.

CHERNYAK, Sergei; PODGORNOVA, Angelina; DOROFEEV, Sergey; MAKSIMOV, Sergey; MASLAKOV, Konstantin; SAVILOV, Serguei; LUNIN, Valery. Synthesis and modification of pristine and nitrogen-doped carbon dots by combining template pyrolysis and oxidation. **Applied Surface Science**, [S. l.], v. 507, n. October 2019, p. 145027, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.145027>. Acesso em: 29 dez. 2020.

CHIKH, Karim; BOUHADJAR, Larbi; KHERROUB, Djamel Eddine; MEGHABAR, Rachid; BELBACHIR, Mohamed. Synthesis and Characterization of Polyvinyl Alcohol / Na + -MMt Nanocomposite : Effect of Charge Content and CO 2 Adsorption Properties. **C**, [S. l.], v. 9, n. 6, p. 90–94, 2017.

DAVARDOOSTMANESH, Maryam; AHMADZADEH, Hossein; GOHARSHADI, Elaheh K.; MESHKINI, Azadeh; SISTANIPOUR, Elnaz. Electrophoretic extraction of highly monodispersed graphene quantum dots from widely polydispersed bulk and its cytotoxicity effect against cancer cells. **Microchemical Journal**, [S. l.], v. 159, n. June, p. 105391, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.105391>. Acesso em: 21 set. 2020.

DHENADHAYALAN, Namasivayam; LIN, King Chuen; SALEH, Tawfik A. Recent Advances in Functionalized Carbon Dots toward the Design of Efficient Materials for Sensing and Catalysis Applications. **Small**, [S. l.], v. 16, n. 1, p. 1–24, 2020.

DING, Hui; YU, Shang Bo; WEI, Ji Shi; XIONG, Huan Ming. Full-color light-emitting carbon dots with a surface-state-controlled luminescence mechanism. **ACS Nano**, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 484–491, 2016.

DU, Xiang-Yun; WANG, Cai-Feng; WU, Guan; CHEN, Su. The Rapid and Large-Scale Production of Carbon Quantum Dots and their Integration with Polymers. **Angewandte Chemie International Edition**, [S. l.], v. 60, n. 16, p. 8585–8595, 2021. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/anie.202004109>. Acesso em: 20 out. 2020.

EL-SHAMY, Ahmed G.; ZAYIED, H. S. S. New polyvinyl alcohol/carbon quantum dots (PVA/CQDs) nanocomposite films: Structural, optical and catalysis properties. **Synthetic Metals**, [S. l.], v. 259, n. October 2019, p. 116218, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2019.116218>. Acesso em: 07 nov. 2020.

FARINOLA, Gianluca M.; RAGNI, Roberta. Electroluminescent materials for white organic light emitting diodes. **Chemical Society Reviews**, [S. l.], v. 40, n. 7, p. 3467–3482, 2011.

FENG, Tanglue; ZENG, Qingsen; LU, Siyu; YAN, Xianju; LIU, Junjun; TAO, Songyuan; YANG, Mingxi; YANG, Bai. Color-Tunable Carbon Dots Possessing Solid-State Emission for Full-Color Light-Emitting Diodes Applications. **ACS Photonics**, [S. l.], v. 5, n. 2, p. 502–510, 2018.

FILALI, Samira; PIROT, Fabrice; MIOSSEC, Pierre. Biological Applications and Toxicity Minimization of Semiconductor Quantum Dots. **Trends in Biotechnology**, [S. l.], v. 38, n. 2, p. 163–177, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2019.07.013>. Acesso em: 21 jul. 2020.

GAO, D.; ZHAO, H.; CHEN, X.; FAN, H. Recent advance in red-emissive carbon dots and their photoluminescent mechanisms. **Materials Today Chemistry**, [S. l.], v. 9, p. 103–113, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2018.06.004>. Acesso em: 16 nov. 2019.

GAO, Dong; ZHANG, Yusheng; LIU, Amin; ZHU, Yuda; CHEN, Suping; WEI, Dan; SUN, Jing; GUO, Zhenzhen; FAN, Hongsong. Photoluminescence-tunable carbon dots from synergy effect of sulfur doping and water engineering. **Chemical Engineering Journal**, [S. l.], v. 388, n. November 2019, p. 124199, 2020a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124199>. Acesso em: 31 jul. 2020.

GAO, Ningxiao; HUANG, Libing; LI, Tianya; SONG, Jinghui; HU, Hengwei; LIU, Yong; RAMAKRISHNA, Seeram. Application of carbon dots in dye-sensitized solar cells: A review. **Journal of Applied Polymer Science**, [S. l.], v. 137, n. 10, p. 1–11, 2020b.

GAO, Wenli; ZHOU, Yanmei; XU, Chenggong; GUO, Meixia; QI, Zhichong; PENG, Xiaojun; GAO, Bin. Bright hydrophilic and organophilic fluorescence carbon dots: One-pot fabrication and multi-functional applications at visualized Au³⁺ detection in cell and white light-emitting devices. **Sensors and Actuators, B: Chemical**, [S. l.], v. 281, n. November 2018, p. 905–911, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.11.024>. Acesso em: 21 jul. 2020.

GOURIANOVA, Svetlana; FUHRMANN, Jürgen. Depth Profiling of Ultrathin P(S-b-MMA) Diblock Copolymer Films by Selective Solvent Crazing. **Macromolecules**, [S. l.], v. 37, n. 5, p. 1825–1830, 2004.

HAN, Wenyan; LI, Degang; ZHANG, Manqi; XIMIN, Hu; DUAN, Xiaoguang; LIU, Shaomin; WANG, Shaobin. Photocatalytic activation of peroxymonosulfate by surface-tailored carbon quantum dots. **Journal of Hazardous Materials**, [S. l.], v. 395, n. February, 2020.

HE, Jiangling et al. Solid-State Carbon Dots with Red Fluorescence and Efficient Construction of Dual-Fluorescence Morphologies. **Small**, [S. l.], v. 13, n. 26, p. 1–10, 2017.

HE, Ping; SHI, Yuxin; MENG, Ting; YUAN, Ting; LI, Yunchao; LI, Xiaohong; ZHANG, Yang; FAN, Louzhen; YANG, Shihe. Recent advances in white light-emitting diodes of carbon quantum dots. **Nanoscale**, [S. l.], v. 12, n. 8, p. 4826–4832, 2020.

HINOV, Nikolay; TSANKOV, Plamen; IBRISHIMOV, Hristo. Innovative led lighting. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CREATIVE BUSINESS FOR SMART AND*

SUSTAINABLE GROWTH, CREBUS 2019, **Anais [...]**. : IEEE, 2019. p. 1–5.

HOLÁ, Kateřina; SUDOLSKÁ, Mária; KALYTCHUK, Sergii; NACHTIGALLOVÁ, Dana; ROGACH, Andrey L.; OTYEPKA, Michal; ZBOŘIL, Radek. Graphitic Nitrogen Triggers Red Fluorescence in Carbon Dots. **ACS Nano**, [S. l.], v. 11, n. 12, p. 12402–12410, 2017.

HU, Chao; LI, Mingyu; QIU, Jieshan; SUN, Ya-Ping. Design and fabrication of carbon dots for energy conversion and storage. **Chemical Society Reviews**, [S. l.], v. 48, n. 8, p. 2315–2337, 2019. Disponível em: <http://xlink.rsc.org/?DOI=C8CS00750K>. Acesso em: 18 mar. 2020.

HU, Meng; GU, Xiaoyu; HU, Yang; DENG, Yonghong; WANG, Chaoyang. PVA/Carbon Dot Nanocomposite Hydrogels for Simple Introduction of Ag Nanoparticles with Enhanced Antibacterial Activity. **Macromolecular Materials and Engineering**, [S. l.], v. 301, n. 11, p. 1352–1362, 2016.

HU, Qin; LIU, Ling fei; SUN, Huijuan; HAN, Jie; GONG, Xiaojuan; LIU, Lizhen; YANG, Zhen quan. An ultra-selective fluorescence method with enhanced sensitivity for the determination of manganese (VII) in food stuffs using carbon quantum dots as nanoprobe. **Journal of Food Composition and Analysis**, [S. l.], v. 88, n. February, p. 103447, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103447>. Acesso em: 01 out. 2020.

HU, Tantan; WEN, Zhuoqi; THOMAS, Tiju; WANG, Chuanxi; SONG, Qijun; YANG, Minghui; WANG, Chan. Temperature-controlled spectral tuning of full-color carbon dots and their strongly fluorescent solid-state polymer composites for light-emitting diodes. **Nanoscale Advances**, [S. l.], v. 1, n. 4, p. 1413–1420, 2019b.

HUANG, Saipeng; LI, Wenshuai; HAN, Pu; ZHOU, Xin; CHENG, Jiewei; WEN, Huiyun; XUE, Weiming. Carbon quantum dots: Synthesis, properties, and sensing applications as a potential clinical analytical method. **Analytical Methods**, [S. l.], v. 11, n. 17, p. 2240–2258, 2019.

HUANG, Yuge; HSIANG, En Lin; DENG, Ming Yang; WU, Shin Tson. Mini-LED, Micro-LED and OLED displays: present status and future perspectives. **Light: Science and Applications**, [S. l.], v. 9, n. 1, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s41377-020-0341-9>. Acesso em: 31 jul. 2020.

HUXLEY, H. E. Biophysics and Molecular Biology. **Nature**, [S. l.], v. 195, n. 4842, p. 633–634, 1962. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/195633b0>. Acesso em: 19 ago. 2020.

JEONG, Ji-Eun; UDDIN, Mohammad Afsar; RYU, Hwa Sook; KIM, Hee-Chang; KANG, Minsu; JOUNG, Joonyoung Francis; PARK, Sungnam; SHIM, Sang-Hee; WOO, Han Young. Green-, Red-, and Near-Infrared-Emitting Polymer Dot Probes for Simultaneous Multicolor Cell Imaging with a Single Excitation Wavelength. **Chemistry of Materials**, [S. l.], v. 32, n. 15, p. 6685–6696, 2020. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.chemmater.0c02172>. Acesso em: 18 ago. 2020.

JIANG, Kai; FENG, Xiangyu; GAO, Xiaolu; WANG, Yuhui; CAI, Congzhong; LI, Zhongjun; LIN, Hengwei. Preparation of multicolor photoluminescent carbon dots by tuning

surface states. **Nanomaterials**, [S. l.], v. 9, n. 4, p. 1–12, 2019.

JIANG, Kai; SUN, Shan; ZHANG, Ling; LU, Yue; WU, Aiguo; CAI, Congzhong; LIN, Hengwei. Red, green, and blue luminescence by carbon dots: Full-color emission tuning and multicolor cellular imaging. **Angewandte Chemie - International Edition**, [S. l.], v. 54, n. 18, p. 5360–5363, 2015.

KANG, Zhenhui; LEE, Shuit Tong. Carbon dots: Advances in nanocarbon applications. **Nanoscale**, [S. l.], v. 11, n. 41, p. 19214–19224, 2019.

KARGOZAR, Saeid; HOSEINI, Seyed Javad; MILAN, Peiman Brouki; HOOSHMAND, Sara; KIM, Hae-Won; MOZAFARI, Masoud. Quantum Dots: A Review from Concept to Clinic. **Biotechnology Journal**, [S. l.], v. 15, n. 12, p. 2000117, 2020. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/biot.202000117>. Acesso em: 07 out. 2020.

KAYS, Joshua C.; SAEBOE, Alexander M.; TOUFANIAN, Reyhaneh; KURANT, Danielle E.; DENNIS, Allison M. Shell-Free Copper Indium Sulfide Quantum Dots Induce Toxicity in Vitro and in Vivo. **Nano Letters**, [S. l.], v. 20, n. 3, p. 1980–1991, 2020.

KHAN, N.; ABAS, N. Comparative study of energy saving light sources. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 15, n. 1, p. 296–309, 2011.

KIM, Kyeong Hyeon; SONG, Jang Kun. Technical evolution of liquid crystal displays. **NPG Asia Materials**, [S. l.], v. 1, n. 1, p. 29–36, 2009.

KOVÁČOVÁ, Mária; ŠPITALSKÁ, Eva; MARKOVIC, Zoran; ŠPITÁLSKÝ, Zdenko. Carbon Quantum Dots As Antibacterial Photosensitizers and Their Polymer Nanocomposite Applications. **Particle and Particle Systems Characterization**, [S. l.], v. 37, n. 1, p. 1–11, 2020.

KUNDELEV, Evgeny V.; TEPLIAKOV, Nikita V.; LEONOV, Mikhail Yu; MASLOV, Vladimir G.; BARANOV, Alexander V.; FEDOROV, Anatoly V.; RUKHLENKO, Ivan D.; ROGACH, Andrey L. Amino Functionalization of Carbon Dots Leads to Red Emission Enhancement. **Journal of Physical Chemistry Letters**, [S. l.], v. 10, n. 17, p. 5111–5116, 2019.

KURT, Saliha B.; SAHINER, Nurettin. Chitosan based fibers embedding carbon dots with anti-bacterial and fluorescent properties. **Polymer Composites**, [S. l.], v. 42, n. 2, p. 872–880, 2021.

LAAPERI, Antti. OLED lifetime issues from a mobile-phone-industry point of view. **Journal of the Society for Information Display**, [S. l.], v. 16, n. 11, p. 1125, 2008.

LAKOWICZ, Joseph R. **Principles of Fluorescence Spectroscopy**. 3. ed. Baltimore, USA: Springer, v. 1, 2006. *E-book*. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/BF02629943>. Acesso em: 31 jan. 2021.

LEI, Chih-Wei; HSIEH, Meng-Lin; LIU, Wei-Ren. A facile approach to synthesize carbon quantum dots with pH-dependent properties. **Dyes and Pigments**, [S. l.], v. 169, n. February, p. 73–80, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2019.05.014>. Acesso em: 28

dez. 2021.

LI, Xiaoxi; WANG, Zifei; LIU, Yang; ZHANG, Weiguang; ZHU, Chaofeng; MENG, Xiangeng. Bright tricolor ultrabroad-band emission carbon dots for white light-emitting diodes with a 96.5 high color rendering index. **Journal of Materials Chemistry C**, [S. l.], v. 8, n. 4, p. 1286–1291, 2020a.

LI, Yadong; XU, Xiaokai; WU, Ying; ZHUANG, Jianle; ZHANG, Xuejie; ZHANG, Haoran; LEI, Bingfu; HU, Chaofan; LIU, Yingliang. A review on the effects of carbon dots in plant systems. **Materials Chemistry Frontiers**, [S. l.], v. 4, n. 2, p. 437–448, 2020b.

LIN, Hao et al. Stable and efficient hybrid Ag-In-S/ZnS@SiO₂-carbon quantum dots nanocomposites for white light-emitting diodes. **Chemical Engineering Journal**, [S. l.], v. 393, n. January, p. 124654, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124654>. Acesso em: 19 out. 2020.

LIU, Yanfeng; GOU, Huilin; HUANG, Xin; ZHANG, Guiyang; XI, Kai; JIA, Xudong. Rational synthesis of highly efficient ultra-narrow red-emitting carbon quantum dots for NIR-II two-photon bioimaging. **Nanoscale**, [S. l.], v. 12, n. 3, p. 1589–1601, 2020a.

LIU, Zhaojun et al. Micro-light-emitting diodes with quantum dots in display technology. **Light: Science and Applications**, [S. l.], v. 9, n. 1, p. 1–23, 2020b. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s41377-020-0268-1>. Acesso em: 12 ago. 2020.

LUO, Xueli; HAN, Yong; CHEN, Xiumei; TANG, Wenzhi; YUE, Tianli; LI, Zhonghong. Carbon dots derived fluorescent nanosensors as versatile tools for food quality and safety assessment: A review. **Trends in Food Science and Technology**, [S. l.], v. 95, n. September 2019, p. 149–161, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.11.017>. Acesso em: 14 ago. 2020.

LV, Ziyu; WANG, Yan; CHEN, Jingrui; WANG, Junjie; ZHOU, Ye; HAN, Su Ting. Semiconductor Quantum Dots for Memories and Neuromorphic Computing Systems. **Chemical Reviews**, [S. l.], v. 120, n. 9, p. 3941–4006, 2020.

MA, Panpan; SUN, Xiaobo; PAN, Wei; YU, Guifeng; WANG, Jinping. Green and Orange Emissive Carbon Dots with High Quantum Yields Dispersed in Matrices for Phosphor-Based White LEDs. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, [S. l.], v. 8, n. 8, p. 3151–3161, 2020a. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acssuschemeng.9b06008>. Acesso em: 22 mar. 2020.

MA, Yurong; ZHANG, Mengling; WANG, Huibo; WANG, Bo; HUANG, Hui; LIU, Yang; KANG, Zhenhui. N-doped carbon dots derived from leaves with low toxicity via damaging cytomembrane for broad-spectrum antibacterial activity. **Materials Today Communications**, [S. l.], v. 24, n. May, p. 101222, 2020b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101222>. Acesso em: 31 jul. 2020.

MADHU, Manivannan; CHEN, Tzu Heng; TSENG, Wei Lung. White-light emission of single carbon dots prepared by hydrothermal carbonization of poly(diallyldimethylammonium chloride): Applications to fabrication of white-light-emitting films. **Journal of Colloid and Interface Science**, [S. l.], v. 556, n. 70, p. 120–127, 2019. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.08.049>. Acesso em: 22 mar. 2020.

MAHMOUD, Mohamed E.; FEKRY, Nesma A.; ABDELFAHATTAH, Amir M. Removal of uranium (VI) from water by the action of microwave-rapid green synthesized carbon quantum dots from starch-water system and supported onto polymeric matrix. **Journal of hazardous materials**, [S. l.], v. 397, n. January, p. 122770, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122770>. Acesso em: 17 set. 2020.

MATOS, Beatriz; MARTINS, Marta; SAMAMED, Antonio Cid; SOUSA, David; FERREIRA, Isabel; DINIZ, Mário S. Toxicity evaluation of quantum dots (ZnS and CdS) singly and combined in Zebrafish (*Danio rerio*). **International Journal of Environmental Research and Public Health**, [S. l.], v. 17, n. 1, p. 1–18, 2020.

MEI, Lin et al. Augmented Graphene Quantum Dot-Light Irradiation Therapy for Bacteria-Infected Wounds. **ACS Applied Materials & Interfaces**, [S. l.], v. 12, n. 36, p. 40153–40162, 2020. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsami.0c13237>. Acesso em: 18 ago. 2020.

MEIRELLES, F. S. Panorama e Indicadores do Uso da Tecnologia de Informação nas Empresas. [S. l.: s. n.], p. 22–60, 2020. Disponível em: https://eaesp.fgv.br/sites/eaesp.fgv.br/files/noticias2019fgvcia_2019.pdf. Acesso em: 05 jul. 2020.

MIAO, Xiang; QU, Dan; YANG, Dongxue; NIE, Bing; ZHAO, Yikang; FAN, Hongyou; SUN, Zaicheng. Synthesis of Carbon Dots with Multiple Color Emission by Controlled Graphitization and Surface Functionalization. **Advanced Materials**, [S. l.], v. 30, n. 1, p. 1–8, 2018.

MESSLER, Gary L.; FISCHER, Paul J.; TARR, Donald A. **Química inorgânica**. 5ª ed. São Paulo: Pearson Education, 2014.

MOLAEI, M.; MARANDI, M.; SAIEVAR-IRANIZAD, E.; TAGHAVINIA, N.; LIU, B.; SUN, H. D.; SUN, X. W. Near-white emitting QD-LED based on hydrophilic CdS nanocrystals. **Journal of Luminescence**, [S. l.], v. 132, n. 2, p. 467–473, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlumin.2011.08.038>. Acesso em: 19 fev. 2021.

MONDAL, Tapas Kumar; SAHA, Shyamal K. Facile Approach To Synthesize Nitrogen- and Oxygen-Rich Carbon Quantum Dots for pH Sensor, Fluorescent Indicator, and Invisible Ink Applications. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, [S. l.], v. 7, n. 24, p. 19669–19678, 2019. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acssuschemeng.9b04817>. Acesso em: 28 dez. 2021.

MUTHUSANKAR, Ganesan; DEVI, Ramadhass Keerthika; GOPU, Gopalakrishnan. Nitrogen-doped carbon quantum dots embedded Co₃O₄ with multiwall carbon nanotubes: An efficient probe for the simultaneous determination of anticancer and antibiotic drugs. **Biosensors & bioelectronics**, [S. l.], v. 150, n. December 2019, p. 111947, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.bios.2019.111947>. Acesso em: 27 set. 2020.

OHSHIMA, Hiroyuki. Mobile display technologies: Past, present and future. *In*: 2014 IEEE ASIAN SOLID-STATE CIRCUITS CONFERENCE (A-SSCC) 2014, **Anais [...]**. : IEEE,

2014. p. 1–4. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7008845/>. Acesso em: 02 abr. 2020.

PALONCÝOVÁ, Markéta; LANGER, Michal; OTYEPKA, Michal. Structural Dynamics of Carbon Dots in Water and N, N -Dimethylformamide Probed by All-Atom Molecular Dynamics Simulations. **Journal of Chemical Theory and Computation**, [S. l.], v. 14, n. 4, p. 2076–2083, 2018.

PARK, Sung Jun; PARK, Jin Young; CHUNG, Jong Won; YANG, Hyun Kyoung; MOON, Byung Kee; YI, Soung Soo. Color tunable carbon quantum dots from wasted paper by different solvents for anti-counterfeiting and fluorescent flexible film. **Chemical Engineering Journal**, [S. l.], v. 383, n. July 2019, 2020.

PATIL, Akshay S.; WAGHMARE, Ravindra D.; PAWAR, Samadhan P.; SALUNKHE, Suresh T.; KOLEKAR, Govind B.; SOHN, Daewon; GORE, Anil H. Photophysical insights of highly transparent, flexible and re-emissive PVA @ WTR-CDs composite thin films: A next generation food packaging material for UV blocking applications. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, [S. l.], v. 400, n. November 2019, p. 112647, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2020.112647>. Acesso em: 02 jul. 2021.

PENG, Deng; ZHANG, Ke; CHAO, Victor Shin Deh; MO, Weijing; LAU, Kei May; LIU, Zhaojun. Full-color pixelated-addressable light emitting diode on transparent substrate (LEDoTS) micro-displays by CoB. **Journal of Display Technology**, [S. l.], v. 12, n. 7, p. 724–746, 2016.

PENG, Deng; ZHANG, Ke; LIU, Zhaojun. Design and Fabrication of Fine-Pitch Pixelated-Addressed Micro-LED Arrays on Printed Circuit Board for Display and Communication Applications. **IEEE Journal of the Electron Devices Society**, [S. l.], v. 5, n. 1, p. 90–94, 2017.

QU, Dan; YANG, Dongxue; SUN, Yukun; WANG, Xiayan; SUN, Zaicheng. White Emissive Carbon Dots Actuated by the H-/J-Aggregates and Förster Resonance Energy Transfer. **Journal of Physical Chemistry Letters**, [S. l.], v. 10, n. 14, p. 3849–3857, 2019.

RANI, Priyanka; AHAMED, Basheer; DESHMUKH, Kalim. Electromagnetic interference shielding properties of graphene quantum-dots reinforced poly(vinyl alcohol)/polypyrrole blend nanocomposites. **Journal of Applied Polymer Science**, [S. l.], v. 137, n. 45, 2020.

RANI, Umairah Abd; NG, Law Yong; NG, Ching Yin; MAHMOUDI, Ebrahim. A review of carbon quantum dots and their applications in wastewater treatment. **Advances in Colloid and Interface Science**, [S. l.], v. 278, p. 102124, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102124>. Acesso em: 18 ago. 2020.

REINEKE, Sebastian; THOMSCHKE, Michael; LÜSSEM, Björn; LEO, Karl. White organic light-emitting diodes: Status and perspective. **Reviews of Modern Physics**, [S. l.], v. 85, n. 3, p. 1245–1293, 2013.

RUDAN, Massimo. **Physics of Semiconductor Devices**. New York, NY: Springer New York, 2015. v. 53. *E-book*. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4939->

1151-6. Acesso em: 12 ago. 2020.

SHAMSIPUR, Mojtaba; BARATI, Ali; KARAMI, Sara. Long-wavelength, multicolor, and white-light emitting carbon-based dots: Achievements made, challenges remaining, and applications. **Carbon**, [S. l.], v. 124, p. 429–472, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.08.072>. Acesso em: 22 mar. 2020.

SHAO, Jieren; ZHU, Shoujun; LIU, Huiwen; SONG, Yubin; TAO, Songyuan; YANG, Bai. Full-Color Emission Polymer Carbon Dots with Quench-Resistant Solid-State Fluorescence. **Advanced Science**, [S. l.], v. 4, n. 12, p. 1–8, 2017.

SHI, Chenyang; BEECHER, Alexander N.; LI, Yan; OWEN, Jonathan S.; LEU, Bogdan M.; SAID, Ayman H.; HU, Michael Y.; BILLINGE, Simon J. L. Size-Dependent Lattice Dynamics of Atomically Precise Cadmium Selenide Quantum Dots. **Physical Review Letters**, [S. l.], v. 122, n. 2, p. 26101, 2019a. Disponível em: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.026101>. Acesso em: 12 ago. 2020.

SHI, Xinxin; MENG, Hongmin; SUN, Yuanqiang; QU, Lingbo; LIN, Yuehe; LI, Zhaohui; DU, Dan. Far-Red to Near-Infrared Carbon Dots: Preparation and Applications in Biotechnology. **Small**, [S. l.], v. 1901507, p. 1–17, 2019b.

SHIRANI, Marziyeh Poshteh; REZAEI, Behzad; ENSAFI, Ali A.; RAMEZANI, Mohammad. Development of an eco-friendly fluorescence nanosensor based on molecularly imprinted polymer on silica-carbon quantum dot for the rapid indoxacarb detection. **Food Chemistry**, [S. l.], v. 339, n. June 2019, p. 127920, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127920>. Acesso em: 03 nov. 2021.

SINGH, Amandeep et al. Carbon dots derived from human hair for ppb level chloroform sensing in water. **Sustainable Materials and Technologies**, [S. l.], v. 25, p. e00159, 2020a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2020.e00159>. Acesso em: 21 set. 2020.

SINGH, D. P.; DUPONCHEL, B.; KONDRATENKO, K.; BOUSSOUALEM, Y.; PUJAR, G. H.; INAMDAR, S. R.; DOUALI, R.; DAOUDI, A. Phase Contraction, fluorescence quenching and formation of topological defects in chiral smectic C matrix by Cd 0.15 Zn 0.85 S/ZnS core/shell quantum dots dispersion: Faster electro-optic response for gadget displays. **Liquid Crystals**, [S. l.], v. 47, n. 11, p. 1638–1654, 2020b. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02678292.2020.1754939>. Acesso em: 12 ago. 2020.

SOHEL, Md Amir; MONDAL, Abhijit; ARIF, P. Mohammad; THOMAS, Sabu; SENGUPTA, Asmita. Effects of graphene on thermal properties and thermal stability of polycarbonate/graphene nanocomposite. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, [S. l.], p. 1–19, 2021.

SONG, Xiaoqian; GUO, Qianyi; CAI, Zhenlu; QIU, Jianrong; DONG, Guoping. Synthesis of multi-color fluorescent carbon quantum dots and solid state CQDs@SiO₂ nanophosphors for light-emitting devices. **Ceramics International**, [S. l.], v. 45, n. 14, p. 17387–17394, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.05.299>. Acesso em: 18 mar. 2020.

SU, Wen; GUO, Ruihua; YUAN, Fanglong; LI, Yunchao; LI, Xiaohong; ZHANG, Yang; ZHOU, Shixin; FAN, Louzhen. Red-Emissive Carbon Quantum Dots for Nuclear Drug

Delivery in Cancer Stem Cells. **Journal of Physical Chemistry Letters**, [S. l.], v. 11, n. 4, p. 1357–1363, 2020.

SUN, Mingye; HAN, Yue; YUAN, Xi; JING, Pengtao; ZHANG, Lei; ZHAO, Jialong; ZHENG, Youjin. Efficient full-color emitting carbon-dot-based composite phosphors by chemical dispersion. **Nanoscale**, [S. l.], v. 12, n. 29, p. 15823–15831, 2020. Disponível em: http://feeds.rsc.org/~r/rss/NR/~3/msunyLSI-2M/D0NR02021D?utm_source=researcher_app&utm_medium=referral&utm_campaign=RESR_MRKT_Researcher_inbound. Acesso em: 22 jul. 2020.

TANNAS, L. E. Evolution of flat-panel displays. **Proceedings of the IEEE**, [S. l.], v. 82, n. 4, p. 499–509, 1994. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/282228/>. Acesso em: 01 abr. 2020.

TATSI, Kristi; HUTCHINSON, Thomas H.; HANDY, Richard D. Consequences of surface coatings and soil ageing on the toxicity of cadmium telluride quantum dots to the earthworm *Eisenia fetida*. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, [S. l.], v. 201, n. May, p. 110813, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110813>. Acesso em: 07 out. 2020.

TIAN, Zhen; ZHANG, Xutao; LI, Di; ZHOU, Ding; JING, Pengtao; SHEN, Dezhen; QU, Songnan; ZBORIL, Radek; ROGACH, Andrey L. Full-Color Inorganic Carbon Dot Phosphors for White-Light-Emitting Diodes. **Advanced Optical Materials**, [S. l.], v. 5, n. 19, 2017.

TOMCZAK, Nikodem; JAŃCZEWSKI, Dominik; HAN, Mingyong; VANCOSO, G. Julius. Designer polymer-quantum dot architectures. **Progress in Polymer Science (Oxford)**, [S. l.], v. 34, n. 5, p. 393–430, 2009.

TONG, Caiyu; LIU, Xinyi; LI, Weizeng; LIU, Zhaojun. P-6.7: Investigation of Full-Color Solutions for Micro-LED Display. **SID Symposium Digest of Technical Papers**, [S. l.], v. 50, n. S1, p. 771–774, 2019. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/sdtp.13643>. Acesso em: 28 mar. 2020.

VEDAMALAI, Mani; PERIASAMY, Arun Prakash; WANG, Chia Wei; TSENG, Yu Ting; HO, Lin Chen; SHIH, Chung Chien; CHANG, Huan Tsung. Carbon nanodots prepared from o-phenylenediamine for sensing of Cu²⁺ ions in cells. **Nanoscale**, [S. l.], v. 6, n. 21, p. 13119–13125, 2014.

VERHAGEN, Amy; KELARAKIS, Antonios. Carbon Dots for Forensic Applications: A Critical Review. **Nanomaterials**, [S. l.], v. 10, n. 8, p. 1535, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-4991/10/8/1535>. Acesso em: 14 ago. 2020.

WANG, Cunjin; SHI, Huanxian; YANG, Min; YAN, Yujia; LIU, Enzhou; JI, Zhen; FAN, Jun. Facile synthesis of novel carbon quantum dots from biomass waste for highly sensitive detection of iron ions. **Materials Research Bulletin**, [S. l.], v. 124, n. December 2019, p. 110730, 2020a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2019.110730>. Acesso em: 21 set. 2020.

WANG, Haiyu; ZHANG, Tianxiang; ZHU, Jinyang; ZHAI, Yue; WANG, He; BAI, Xue;

DONG, Biao; SONG, Hongwei. A novel mechanism for red emission carbon dots: Hydrogen bond dominated molecular states emission. **Nanoscale**, [S. l.], v. 9, n. 35, p. 13042–13051, 2017a.

WANG, Huilin; LIANG, Xitong; WANG, Jiutian; JIAO, Shengjian; XUE, Dongfeng. Multifunctional inorganic nanomaterials for energy applications. **Nanoscale**, [S. l.], v. 12, n. 1, p. 14–42, 2020b.

WANG, Liang et al. Full-color fluorescent carbon quantum dots. **Science Advances**, [S. l.], v. 6, n. 40, p. eabb6772, 2020c. Disponível em: <https://advances.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/sciadv.abb6772>. Acesso em: 07 out. 2020.

WANG, Ru; LU, Kang Qiang; TANG, Zi Rong; XU, Yi Jun. Recent progress in carbon quantum dots: synthesis, properties and applications in photocatalysis. **Journal of Materials Chemistry A**, [S. l.], v. 5, n. 8, p. 3717–3734, 2017b.

WANG, Zifei; YUAN, Fanglong; LI, Xiaohong; LI, Yunchao; ZHONG, Haizheng; FAN, Louzhen; YANG, Shihe. 53% Efficient Red Emissive Carbon Quantum Dots for High Color Rendering and Stable Warm White-Light-Emitting Diodes. **Advanced Materials**, [S. l.], v. 29, n. 37, p. 1702910, 2017c. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1002/adma.201702910>. Acesso em: 10 set. 2019.

WEI, Jian Yong; LOU, Qing; ZANG, Jin Hao; LIU, Zhi Yu; YE, Yang Li; SHEN, Cheng Long; ZHAO, Wen Bo; DONG, Lin; SHAN, Chong Xin. Scalable Synthesis of Green Fluorescent Carbon Dot Powders with Unprecedented Efficiency. **Advanced Optical Materials**, [S. l.], v. 1901938, p. 1–7, 2020.

WEN, Yan; ZHU, Guang; SHAO, Yi. Improving the power conversion efficiency of perovskite solar cells by adding carbon quantum dots. **Journal of Materials Science**, [S. l.], v. 55, n. 7, p. 2937–2946, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10853-019-04145-9>. Acesso em: 01 out. 2020.

WILLIAMS, Richard J.; HARRISON, Samuel; KELLER, Virginie; KUENEN, Jeroen; LOFTS, Stephen; PRAETORIUS, Antonia; SVENDSEN, Claus; VERMEULEN, Lucie C.; VAN WIJNEN, Jikke. Models for assessing engineered nanomaterial fate and behaviour in the aquatic environment. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, [S. l.], v. 36, p. 105–115, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2018.11.002>. Acesso em: 12 go. 2020.

WU, Minghong et al. Scalable synthesis of organic-soluble carbon quantum dots: Superior optical properties in solvents, solids, and LEDs. **Nanoscale**, [S. l.], v. 9, n. 35, p. 13195–13202, 2017.

WU, Zhongbin; MA, Dongge. Recent advances in white organic light-emitting diodes. **Materials Science and Engineering R: Reports**, [S. l.], v. 107, p. 1–42, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mser.2016.06.001>. Acesso em: 26 mai. 2020.

XIA, Chunlei; ZHU, Shoujun; FENG, Tanglue; YANG, Mingxi; YANG, Bai. Evolution and Synthesis of Carbon Dots: From Carbon Dots to Carbonized Polymer Dots. **Advanced**

Science, [S. l.], v. 6, n. 23, 2019.

XIA, Ling Ling; LI, Cai Lian; WANG, Yan. In-situ crosslinked PVA/organosilica hybrid membranes for pervaporation separations. **Journal of Membrane Science**, [S. l.], v. 498, p. 263–275, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2015.10.025>. Acesso em: 07 jul. 2021.

XIE, Hanhan et al. Biodegradable Bi₂O₂Se Quantum Dots for Photoacoustic Imaging-Guided Cancer Photothermal Therapy. **Small**, [S. l.], v. 16, n. 1, p. 1–11, 2020.

XU, Xiaoyou; RAY, Robert; GU, Yunlong; PLOEHN, Harry J.; GEARHEART, Latha; RAKER, Kyle; SCRIVENS, Walter A. Electrophoretic analysis and purification of fluorescent single-walled carbon nanotube fragments. **Journal of the American Chemical Society**, [S. l.], v. 126, n. 40, p. 12736–12737, 2004.

YAN, Fanyong; JIANG, Yingxia; SUN, Xiaodong; BAI, Zhangjun; ZHANG, Yan; ZHOU, Xuguang. Surface modification and chemical functionalization of carbon dots: a review. **Microchimica Acta**, [S. l.], v. 185, n. 9, 2018.

YANG, Haiyao; LIU, Yingliang; GUO, Zhouyi; LEI, Bingfu; ZHUANG, Jianle; ZHANG, Xuejie; LIU, Zhiming; HU, Chaofan. Hydrophobic carbon dots with blue dispersed emission and red aggregation-induced emission. **Nature Communications**, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 1–11, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-019-09830-6>. Acesso em: 13 set. 2019.

YAO, Bowen; HUANG, Hui; LIU, Yang; KANG, Zhenhui. Carbon Dots: A Small Conundrum. **Trends in Chemistry**, [S. l.], v. 1, n. 2, p. 235–246, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trechm.2019.02.003>. Acesso em: 13 set. 2019.

YAO, Naiqun; WANG, Hanbin; ZHANG, Liqun; YUE, Dongmei; TIAN, Ming. One-pot solvothermal synthesis of silane-functionalized carbon nanodots as compatibilizers for the immiscible TPU/MVQ blends. **Applied Surface Science**, [S. l.], v. 530, n. May, p. 147124, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147124>. Acesso em: 17 set. 2020.

YIN, Yongming; ALI, Muhammad Umair; XIE, Wenfa; YANG, Huai; MENG, Hong. Evolution of white organic light-emitting devices: From academic research to lighting and display applications. **Materials Chemistry Frontiers**, [S. l.], v. 3, n. 6, p. 970–1031, 2019.

YUAN, Fanglong et al. Engineering triangular carbon quantum dots with unprecedented narrow bandwidth emission for multicolored LEDs. **Nature Communications**, [S. l.], v. 9, n. 1, p. 1–11, 2018.

YUAN, Fanglong; HE, Ping; XI, Zifan; LI, Xiaohong; LI, Yunchao; ZHONG, Haizheng; FAN, Louzhen; YANG, Shihe. Highly efficient and stable white LEDs based on pure red narrow bandwidth emission triangular carbon quantum dots for wide-color gamut backlight displays. **Nano Research**, [S. l.], v. 12, n. 7, p. 1669–1674, 2019a.

YUAN, Fanglong; WANG, Zhibin; LI, Xiaohong; LI, Yunchao; TAN, Zhan'ao; FAN, Louzhen; YANG, Shihe. Bright Multicolor Bandgap Fluorescent Carbon Quantum Dots for Electroluminescent Light-Emitting Diodes. **Advanced Materials**, [S. l.], v. 29, n. 3, 2017.

YUAN, Ting; MENG, Ting; HE, Ping; SHI, Yuxin; LI, Yunchao; LI, Xiaohong; FAN, Louzhen; YANG, Shihe. Carbon quantum dots: An emerging material for optoelectronic applications. **Journal of Materials Chemistry C**, [S. l.], v. 7, n. 23, p. 6820–6835, 2019b.

ZHAN, Jing et al. A solvent-engineered molecule fusion strategy for rational synthesis of carbon quantum dots with multicolor bandgap fluorescence. **Carbon**, [S. l.], v. 130, p. 153–163, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.12.075>. Acesso em: 22 jul. 2020.

ZHANG, Pan; YAN, Ke; PAN, Aizhao; ZHU, Yongsheng; HONG, Jun; LIANG, Panting. Use of CdTe Quantum Dots as Heat Resistant Temperature Sensor for Bearing Rotating Elements Monitoring. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, [S. l.], v. 38, n. 3, p. 463–470, 2020a.

ZHANG, Shitong et al. Achieving a Significantly Increased Efficiency in Nondoped Pure Blue Fluorescent OLED: A Quasi-Equivalent Hybridized Excited State. **Advanced Functional Materials**, [S. l.], v. 25, n. 11, p. 1755–1762, 2015.

ZHANG, Xiaoqin; CHEN, Chongyuan; PENG, Dongping; ZHOU, Yizi; ZHUANG, Jianle; ZHANG, Xuejie; LEI, Bingfu; LIU, Yingliang; HU, Chaofan. PH-Responsive carbon dots with red emission for real-time and visual detection of amines. **Journal of Materials Chemistry C**, [S. l.], v. 8, n. 33, p. 11563–11571, 2020b.

ZHANG, Yongqiang; ZHUO, Peng; YIN, Hao; FAN, Yi; ZHANG, Jiahua; LIU, Xingyuan; CHEN, Zhenqiang. Solid-State Fluorescent Carbon Dots with Aggregation-Induced Yellow Emission for White Light-Emitting Diodes with High Luminous Efficiencies. **ACS Applied Materials and Interfaces**, [S. l.], v. 11, n. 27, p. 24395–24403, 2019.

ZHAO, Kangxu; ZHENG, Xuan; ZHANG, Huijun; XU, Menghan; WANG, Shan; YANG, Quanling; XIONG, Chuanxi. Multi-color fluorescent carbon dots with single wavelength excitation for white light-emitting diodes. **Journal of Alloys and Compounds**, [S. l.], v. 793, p. 613–619, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.04.146>. Acesso em: 22 mar. 2020.

ZHAO, Ming; ZHANG, Qinyuan; XIA, Zhiguo. Narrow-band emitters in LED backlights for liquid-crystal displays. **Materials Today**, [S. l.], v. 40, p. 246–265, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2020.04.032>. Acesso em: 12 ago. 2020.

ZHAO, Xun; WANG, Ailin; GAO, Sili; YAN, Duanting; GUO, Wanying; XU, Yingyue; MENG, Yanli; WANG, Chunliang; SHAN, Guiye. Enhancing photoluminescence of carbon quantum dots doped PVA films with randomly dispersed silica microspheres. **Scientific Reports**, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 1–10, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-020-62563-1>. Acesso em: 01 out. 2020.

ZHAO, Zheng et al. Furan Is Superior to Thiophene: A Furan-Cored AIEgen with Remarkable Chromism and OLED Performance. **Advanced Science**, [S. l.], v. 4, n. 8, p. 1700005, 2017. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/advs.201700005>. Acesso em: 31 jul. 2020.

ZHENG, Yuxin; ARKIN, Kamile; HAO, Jiawei; ZHANG, Siyi; GUAN, Wei; WANG, Lingling; GUO, Yingna; SHANG, Qingkun. Multicolor Carbon Dots Prepared by Single-Factor Control of Graphitization and Surface Oxidation for High-Quality White Light-Emitting Diodes. **Advanced Optical Materials**, [S. l.], v. 2100688, p. 1–11, 2021.

ZHU, Jinyang et al. Carbon dots with efficient solid-state red-light emission through the step-by-step surface modification towards light-emitting diodes. **Dalton Transactions**, [S. l.], v. 47, n. 11, p. 3811–3818, 2018.

ZHU, Shoujun; SONG, Yubin; ZHAO, Xiaohuan; SHAO, Jieren; ZHANG, Junhu; YANG, Bai. The photoluminescence mechanism in carbon dots (graphene quantum dots, carbon nanodots, and polymer dots): current state and future perspective. **Nano Research**, [S. l.], v. 8, n. 2, p. 355–381, 2015.