

# O Cenário Mundial das Pesquisas com Polímeros Conjugados: uma investigação sobre a produção científica e tecnológica em estudos com derivados fluorescentes de tiofeno e de fluoreno

*The World Scenario of Research with Conjugated Polymers: an investigation on scientific and technological production in studies with fluorescent derivatives of thiophene and fluorene*

Vitória Rocha de Oliveira<sup>1</sup>

Jeane Caroline da Silva Melo<sup>1</sup>

Fred Augusto Ribeiro Nogueira<sup>1</sup>

Adriana Santos Ribeiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL, Brasil

## Resumo

As propriedades exibidas pelos polímeros conjugados os tornam promissores para diversas aplicações tecnológicas. A copolimerização de diferentes monômeros surge como alternativa para melhorar as propriedades desses materiais. Este trabalho realiza uma análise dos estudos desenvolvidos com polímeros conjugados, em especial com os derivados de tiofeno e de fluoreno, por meio da busca de patentes e de artigos em bases de dados nacionais e internacionais, usando um conjunto específico de palavras-chave. Os resultados indicam uma tendência no crescimento de publicações envolvendo polímeros conjugados, enquanto os derivados de tiofeno e de fluoreno mostram um aumento menos expressivo, que pode estar associado à especificidade da área. A distribuição geográfica das pesquisas destaca líderes como China e Estados Unidos, apontando para a necessidade de ampliar o desenvolvimento de tecnologias inovadoras em países como o Brasil. As lacunas observadas na área levantam a necessidade de novas pesquisas para explorar o potencial social, científico e econômico desse material.

Palavras-chave: Politiofenos; Polifluorenos; Eletrocromismo.

## Abstract

The properties exhibited by conjugated polymers make them promising for various technological applications. Copolymerization of different monomers emerges as an alternative to improve the properties of these materials. This study analyzes research developed with conjugated polymers, especially with derivatives of thiophene and fluorene, through the search of patents and articles in national and international databases, using a specific set of keywords. The results indicate a trend in the growth of publications involving conjugated polymers, while derivatives of thiophene and fluorene show a less pronounced increase, which may be associated with the specificity of the field. The geographical distribution of research highlights leaders such as China and the United States, pointing to the need to expand the development of innovative technologies in countries like Brazil. The observed gaps in the field raise the need for new research to explore the social, scientific, and economic potential of this material.

Keywords: Polythiophenes; Polyfluorene; Electrochromism.

Áreas Tecnológicas: Química. Semicondutores Orgânicos. Inovação.



# 1 Introdução

Desde que pesquisadores descobriram que os polímeros conjugados podem exibir condutividade elétrica (Shirakawa *et al.*, 1977), a comunidade científica intensificou os estudos com esses polímeros e suas possíveis aplicações. Essa atenção voltada para os polímeros conjugados fez com que os professores MacDiarmid, Heeger e Shirakawa recebessem o Prêmio Nobel de Química do ano 2000 pela descoberta e desenvolvimento do poliacetileno condutor (The Nobel Prize, 2024).

Ao longo dos anos, os polímeros conjugados foram testados e utilizados em diferentes áreas de aplicações comerciais, como baterias (Qin *et al.*, 2023), proteção à corrosão (Dua *et al.*, 2024), diodos emissores de luz (Mandal; Bauri; Choudhary, 2024), células solares e fotodetectores (Liu *et al.*, 2023), supercapacitores para armazenamento de energia (Siwach *et al.*, 2024), células a combustível (Li; Gong, 2020), sensores eletroquímicos (Rayar *et al.*, 2024), dispositivos eletrocromáticos (Carbas; Yildiz, 2024) e fluorescentes (Kaneko; Wang, 2024) e na área de ciências forenses (Fan *et al.*, 2023).

As pesquisas com os polímeros conjugados foram realizadas inicialmente com os polímeros derivados da polianilina, polipirrol, poliacetileno e politiofenos, e, com o avanço dos estudos, outros polímeros e copolímeros atraíram a atenção dos pesquisadores, como polifluoreno e poli(p-fenilenovinileno) (Saini; Pandey; Awasthi, 2021).

Uma das desvantagens dos polímeros conjugados não substituídos é a falta de solubilidade devido à natureza da cadeia principal e às fortes interações intercadeias. A modificação das cadeias dos polímeros conjugados é uma das possibilidades para melhorar a processabilidade e as propriedades desses materiais (Jaymand; Hatamzadeh; Omid, 2015). O processo de copolimerização é muito utilizado para ajustar as propriedades ópticas dos polímeros conjugados. Para ajustar tais propriedades e manipular as aplicações, atualmente os cientistas possuem uma variedade de métodos de síntese que permitem obter copolímeros bem definidos (Gmucova, 2021).

Entre os polímeros conjugados desenvolvidos, os copolímeros de fluoreno e tiofeno surgem como uma classe importante, isso devido à sua estabilidade química, às propriedades eletrônicas e ópticas únicas, à viabilidade para métodos regioseletivos e à possibilidade de introduzir grupos substituintes apropriados nas diferentes posições do anel aromático (Yu; Lin, 2014).

A copolimerização de fluorenos e tiofenos permite unir as propriedades particulares de cada grupo para desenvolver novos materiais híbridos mais eficientes. Os derivados de fluoreno e de polifluoreno têm sido amplamente empregados em diodos emissores de luz poliméricos, células solares poliméricas e dispositivos eletrocromáticos e fluorescentes pela rigidez da estrutura planar, pelas excelentes propriedades de transporte de elétrons, a boa solubilidade, estabilidade química e pela eficiência de fotoluminescência (Nogueira *et al.*, 2019). O *design* e as estratégias para preparação de materiais poliméricos fluorescentes têm recebido grande interesse devido às suas potenciais aplicações em dispositivos ópticos, químicos e biossensores, incluindo investigações forenses (Santos *et al.*, 2021).

Os tiofenos geram polímeros e derivados que se destacam nas mais diversas aplicações devido às suas muitas vantagens como boa estabilidade térmica, *band gaps* menores e características ópticas, como o tempo de resposta rápido, alto contraste, boa processabilidade, entre outros. Um progresso significativo foi alcançado no projeto e síntese de materiais à base de tiofeno com novas estruturas moleculares e excelentes propriedades de fluorescência/emissividade (Dong; Shi; Lu, 2020; Vahdatiyekta *et al.*, 2022). Entre os derivados de tiofeno, um destaque é dado ao bistiofeno, pois a fusão dos dois anéis de tiofeno reduz a distância entre anéis em comparação com a da unidade de tiofeno, e isso faz com que a ressonância do polímero seja mais estável (Carbas; Yildiz, 2024). De acordo com Carbas e Yildiz (2024), a fusão dos anéis reduz o movimento rotacional entre eles, aumentando a planaridade do sistema e garantindo uma melhor sobreposição dos orbitais  $\pi$  para o polímero.

O comprimento da conjugação da cadeia, que está relacionado com a planaridade da estrutura do polímero, afeta as propriedades eletro-ópticas dos polímeros conjugados, porém a adição de cadeias laterais provoca interações que podem perturbar essa planaridade da cadeia polimérica. Um dos artifícios empregados para aumentar a conjugação da estrutura do polímero é a ciclização de repetidos anéis aromáticos.

O preparo de sistemas  $\pi$  conjugados estendidos baseados na introdução de uma ponte de fluoreno na cadeia principal do bistiofeno pode originar materiais que exibem propriedades eletrocromáticas e fluorescentes, como o bistiofeno-2,2'-(9,9-Dioctil-(9H-Fluoreno-2,7-diil) (FBT) (Nogueira *et al.*, 2019; Ribeiro; Mortimer, 2016).

Embora as pesquisas com os derivados de polímeros conjugados tenham se intensificado nas últimas décadas e venham apresentando avanços consideráveis, ainda é necessário avaliar como os derivados de fluoreno-bistiofeno estão sendo explorados para aplicações tecnológicas. Assim, este trabalho propõe avaliar o cenário das pesquisas com os derivados de fluoreno-bistiofeno buscando compreender quais áreas tecnológicas esses materiais estão sendo aplicados e quais países têm realizado mais avanços nos últimos anos.

## 2 Metodologia

As palavras-chave que compõem a pesquisa (Quadro 1) foram definidas com base nas classes de materiais que englobam o material de interesse (*Poly(Fluorene(Bisthiophene))*), de forma a obter um panorama geral da aplicação desse material no cenário mundial das ciências e tecnologia, as buscas foram realizadas majoritariamente em língua inglesa. As pesquisas em língua portuguesa buscaram avaliar os possíveis registros dessas tecnologias em território nacional. O asterisco (\*) foi empregado para ampliar a busca por documentos contendo a parte inicial de uma palavra. O operador *AND* foi usado para restringir a pesquisa a artigos que contenham todas as palavras-chave. Já o operador *OR* foi utilizado para aumentar a sensibilidade da busca, limitando-a a artigos que contenham pelo menos uma das palavras sinônimas.

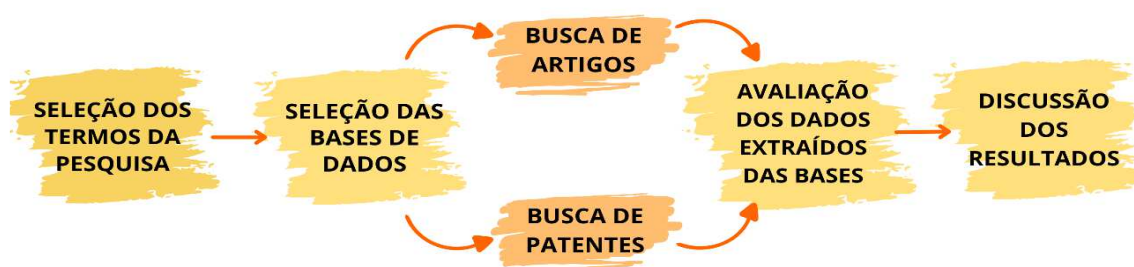
**Quadro 1** – Palavras-chave utilizadas nas buscas em bases de dados

	PALAVRAS-CHAVE
I	(Conducti* OR Conjugated) AND Polymer*
II	(Conducti* OR Conjugated) AND Polymer* AND thiophene*
III	(Conducti* OR Conjugated) AND Polymer* AND fluorene*
IV	(Conducti* OR Conjugated) AND Polymer* AND thiophene* AND fluorene*
V	(Conducti* OR Conjugated) AND Polymer* AND thiophene* AND fluoresc*
VI	(Conducti* OR Conjugated) AND Polymer* AND fluorene* AND fluoresc*
VII	(Conducti* OR Conjugated) AND Polymer* AND thiophene* AND fluorene* AND fluoresc*
VIII	(Conducti* OR Conjugated) AND Polymer* AND thiophene* AND electrochromi*
IX	(Conducti* OR Conjugated) AND Polymer* AND fluorene* AND electrochromi*
X	(Conducti* OR Conjugated) AND Polymer* AND thiophene* AND fluorene* AND electrochromi*
XI	(Conducti* OR Conjugated) AND Polymer* AND Poly(Fluorene(Bisthiophene))

Fonte: Elaborado pelos autores deste artigo (2024)

A Figura 1 apresenta o fluxograma com as etapas da pesquisa. As buscas de patentes foram realizadas nas bases: Patent Inspiration, Escritório Europeu de Patentes (Espacenet), Derwent Innovations Index da Clarivate Analytics e Organização Mundial da Propriedade Intelectual (WIPO – Patentscope). Para a revisão bibliográfica, utilizou-se a base Scopus. As buscas de patentes em língua portuguesa foram realizadas na base de dados do Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI). Todas as buscas foram realizadas no campo de pesquisa avançada, utilizando filtros específicos para a busca nos títulos e nos resumos das patentes e artigos científicos. No caso da Derwent, utilizou-se a função “tópico” para a busca, enquanto na WIPO optou-se pela função de pesquisa na “primeira página” (*front page*), por conter informações relevantes para o estudo. As buscas foram conduzidas entre fevereiro e março de 2024.

**Figura 1** – Fluxograma apresentando as etapas da pesquisa



Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo (2024)

Para a análise dos dados obtidos, foram aplicados métodos de análise descritiva para avaliar a distribuição dos dados em termos de ano de publicação, países de origem, áreas de aplicação e tendências tecnológicas. Os dados foram organizados e categorizados em tabelas e gráficos para visualizar a evolução temporal, distribuição geográfica e o impacto das inovações. A análise de tendências foi realizada com o objetivo de identificar padrões emergentes e lacunas

nas pesquisas existentes. Os resultados das buscas mais específicas (palavras-chave VIII, IX, X e XI) foram filtrados manualmente por meio da leitura dos títulos e dos resumos, com o intuito de avaliar as publicações mais relevantes. Ferramentas de visualização gráfica foram utilizadas para apresentar os resultados de forma clara e objetiva, permitindo uma interpretação mais intuitiva dos dados coletados.

### 3 Resultados e Discussão

Este trabalho foi realizado com o intuito de se compreender o cenário mundial das pesquisas sobre o uso de polímeros conjugados derivados de tiofeno, mais especificamente acerca do potencial de aplicação do Poli(Fluoreno(Bistiofeno)) (PFBT). As palavras-chave foram escolhidas de modo a traçar uma visão ampla, a partir de uma perspectiva mundial, sobre os estudos e aplicações desses materiais (polímeros conjugados e derivados do tiofeno e de fluoreno), assim como o seu potencial de produção tecnológica. Dessa forma, a partir do quantitativo de documentos encontrados nas bases de dados (Tabela 1), é possível observar o grande interesse nas pesquisas e na proteção de tecnologias envolvendo os polímeros conjugados (I), com relação aos polímeros conjugados derivados de tiofeno e fluoreno (II e III) a quantidade de artigos e de patentes encontrados apresenta uma redução expressiva, isso pode estar relacionado ao fato de que a área de polímeros conjugados é considerada nova, já que estudos de polímeros conjugados específicos ainda são recentes, assim como ao fato de a área ser ampla e apresentar um grande crescimento nas últimas décadas, de forma que as linhas de pesquisas se dividem em vários outros derivados (Wen; Xu, 2017). Essa discussão se torna ainda mais pertinente quando se especifica as propriedades e o material de interesse (PFBT), obtendo-se uma redução ainda maior nas publicações encontradas. É importante ressaltar também a quantidade reduzida ou a ausência de resultados encontrados na base de dados do INPI quando se especifica a busca.

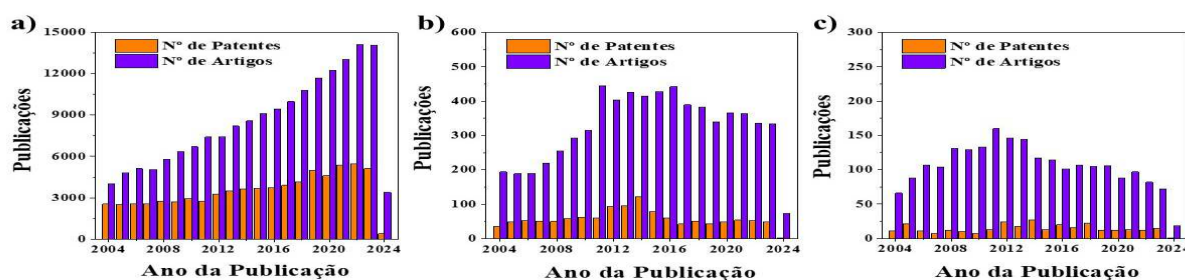
**Tabela 1** – Quantitativo de documentos obtidos nas bases de dados em relação às palavras-chave de I a XI

PALAVRAS-CHAVE	SCOPUS	PATENT INSPIRATION	DERWENT INNOVATIONS	WIPO (PATENTSCOPE)	ESPACENET	INPI
I	215.608	172.109	187.794	144.838	105.145	933
II	8.228	1.811	5.530	1.435	1.248	87
III	2.387	365	1.808	328	253	5
IV	336	48	529	46	36	0
V	647	14	212	8	12	0
VI	690	30	223	24	27	0
VII	65	1	49	0	0	0
VIII	37	55	313	46	34	0
IX	46	7	42	5	7	0
X	8	0	23	0	0	0
XI	3	0	2	0	0	0

Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo a partir das buscas nas bases Scopus, Patent Inspiration, Derwent Innovations, WIPO-Patentscope, Espacenet e INPI

A partir das buscas realizadas, coletou-se uma série de dados fornecidos pelas bases para avaliar o perfil científico e tecnológico dessa linha de pesquisa. O quantitativo de patentes e de artigos publicados por ano (nos últimos 20 anos) é apresentado na Figura 2, em relação às palavras-chave I, II e III. A busca na área de polímeros conjugados (Figura 2a) apresenta um crescimento constante para o número de artigos publicados, o que denota o interesse cada vez maior de pesquisadores por esses materiais, que vêm sendo explorados nas mais diversas linhas de pesquisa, em inúmeras aplicações (Namsheer; Rout, 2021); o quantitativo de patentes para essa palavra-chave (I) também apresenta um perfil semelhante, porém com um crescimento menos acentuado, o que demonstra o grande potencial de produção tecnológica das pesquisas na área, mas também evidencia a necessidade da realização de pesquisas inovadoras, inventivas e aplicáveis. Para o grupo de palavras-chave II (Figura 2b) e III (Figura 2c), a quantidade de artigos e de patentes não apresenta um crescimento constante a cada ano, apontando oscilações no perfil dos gráficos, o que pode estar relacionado à especificidade dos materiais e ao grau de maturidade dessas pesquisas. Pois, uma vez que se trata de pesquisas com materiais específicos e recentes, se fazem necessários estudos mais rigorosos e minuciosos até que se chegue ao ponto de uma produção científica ou tecnológica.

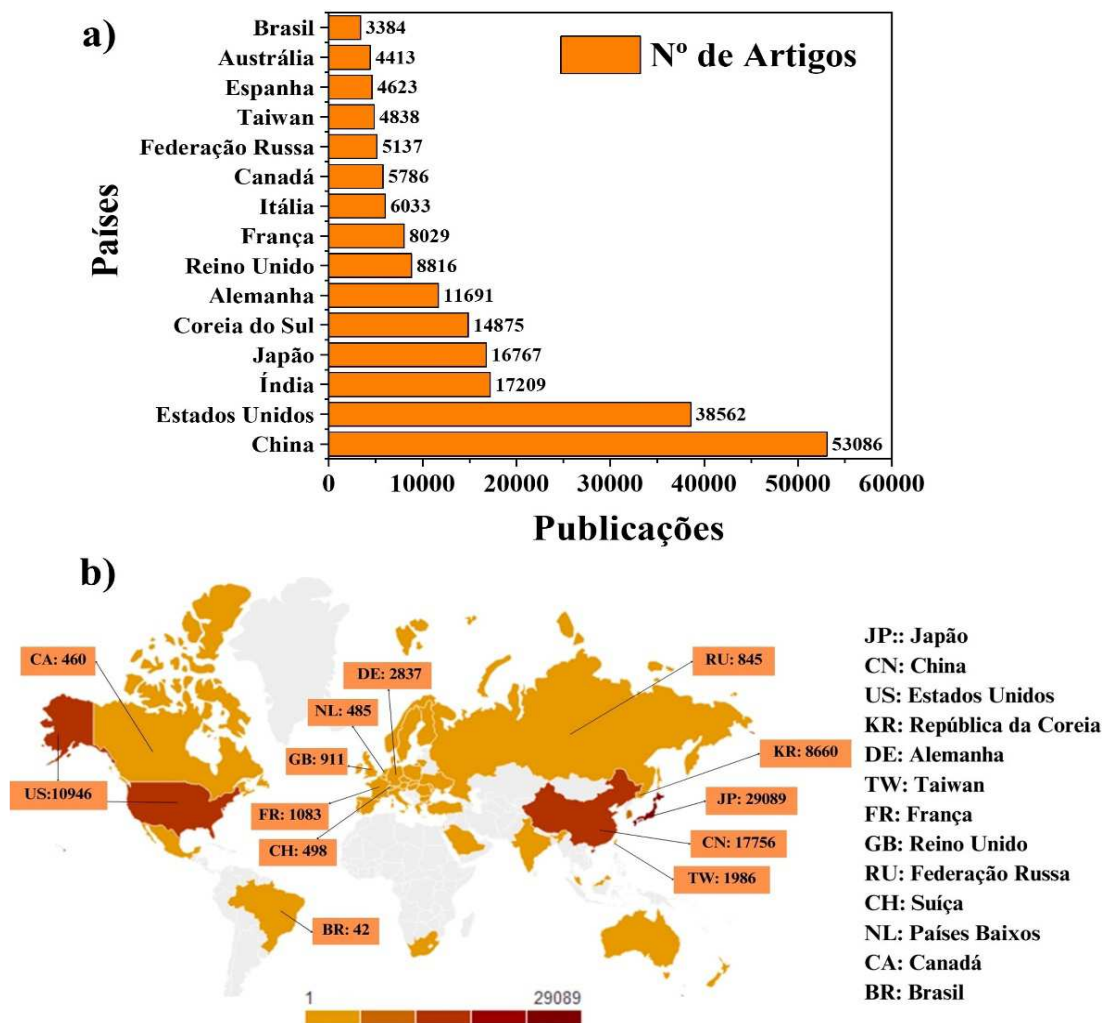
**Figura 2** – Quantitativo de artigos e de patentes em número de publicações por ano relacionados às palavras-chave I(a), II(b) e III(c)



Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo a partir das buscas nas bases Patent Inspiration e Scopus

Em relação aos países responsáveis pelas pesquisas envolvendo polímeros conjugados (Figura 3), observa-se que China, Estados Unidos, Japão, Coreia do Sul (República da Coreia), Alemanha, França e Reino Unido ocupam posições de destaque tanto em relação à publicação de artigos (Figura 3a), quanto em relação às patentes (Figura 3b). A Índia aparece na 3ª posição relacionada à publicação de artigos, mas com relação ao quantitativo de patentes, o país ocupa a 21ª posição. No que diz respeito ao Brasil, observa-se um perfil similar, no qual o país ocupa a 17ª posição no número de artigos publicados, segundo a pesquisa realizada na base de dados Scopus; por outro lado, dados da base Patent Inspiration apresentam o Brasil na 34ª posição em relação ao número de patentes publicadas. Esses resultados demonstram tanto o grande potencial de produção científica desses países, quanto a falta de maturidade e de interesse por parte dos pesquisadores em proteger suas tecnologias. Com relação ao quantitativo de patentes (Figura 3b), é importante ressaltar a quantidade expressiva de patentes depositadas por meio da Organização Mundial da Propriedade Intelectual (OMPI), identificadas pelo código de país WO e Organização Europeia de Patentes (OEP), identificadas pelo código de país EP. O que é muito vantajoso para os inventores dessas patentes, visto que o sistema PCT – Patent Cooperation Treaty (OMPI) conta com 157 países-membros, e a OPE permite que os inventores obtenham proteção para suas invenções em até 44 países-membros.

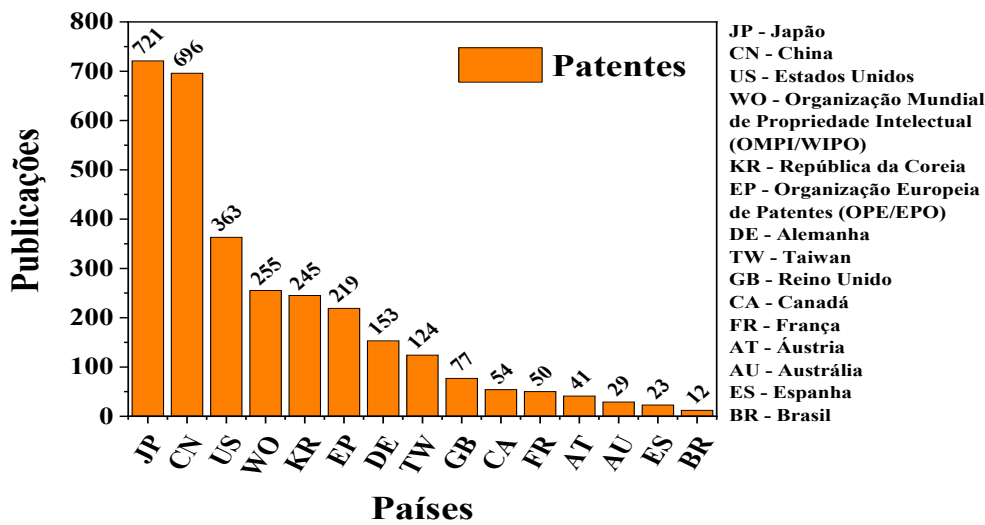
**Figura 3** – Quantitativo de artigos (a) e patentes (b) por país relacionados às palavras-chave I



Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo (a) a partir da consulta na base Scopus e (b) adaptada de Patent Inspiration

A Figura 4 apresenta o quantitativo de patentes por país em relação às palavras-chave de II a XI, sendo assim, é possível observar que, ao especificar as buscar, os resultados seguem um perfil semelhante à área principal (I), desse modo, percebe-se que Japão, China, Estados Unidos, República da Coreia, Alemanha e Reino Unido são os principais depositantes dessas patentes. Também se observa uma quantidade considerável de documentos identificados pelos códigos de país WO e EP. O Brasil surge nesses resultados com um total de 12 patentes relacionadas a polímeros conjugados derivados de tiofeno e de fluoreno, demonstrando o potencial de crescimento das pesquisas na área e a necessidade de os pesquisadores compreenderem a importância econômica e tecnológica de proteger essas pesquisas.

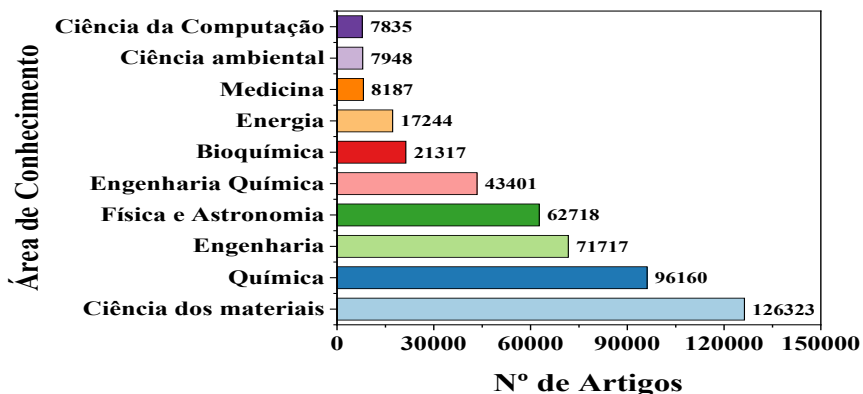
**Figura 4** – Quantitativo de patentes por país relacionadas às palavras-chave de II a XI



Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo a partir da consulta nas bases Patent Inspiration e Espacenet

Os quantitativos de artigos por área de conhecimento (Figura 5) demonstram Ciência de Materiais, Química e Engenharia como as principais áreas nas quais as pesquisas com polímeros conjugados (I) estão inseridas. Para as buscas específicas por pesquisas envolvendo derivados de tiofeno (II) e de fluoreno (III), as áreas seguem um padrão semelhante, sendo Ciências de Materiais, Química, Física e Astronomia, Engenharia Química e Engenharia, nessa ordem, as cinco primeiras áreas que aparecem no ranking de quantidade de artigos na análise dessas palavras-chave (II e III). A diversidade de áreas que também apresentam quantidades significativas de publicações demonstra a versatilidades desses materiais para as mais diversas aplicações em várias áreas do conhecimento; constituindo uma oportunidade e a possibilidade de pesquisas para diversos estudiosos ao redor do mundo.

**Figura 5** – Quantitativo de artigos por área de conhecimento relacionados às palavras-chave I



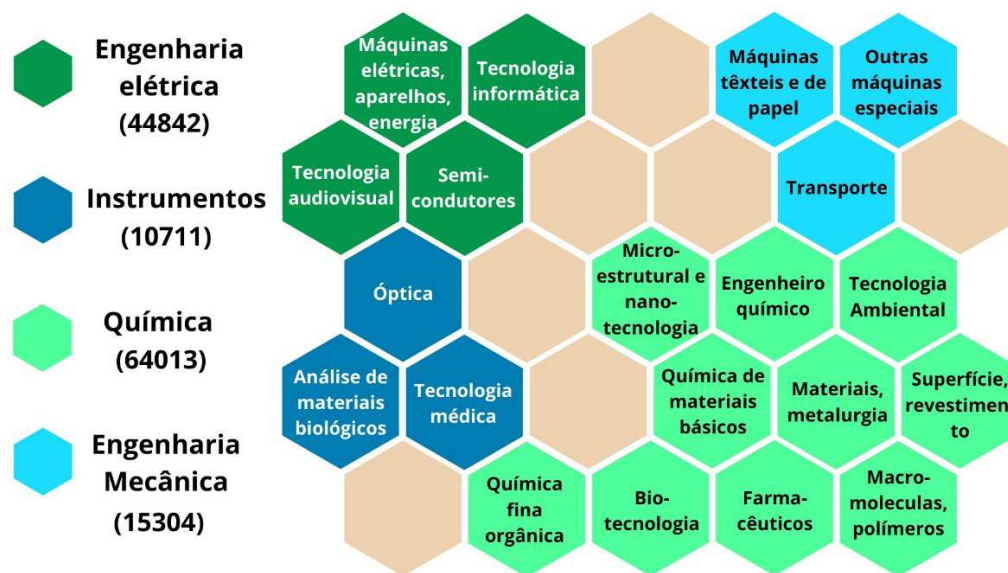
Fonte: Elaborado pelos autores deste artigo a partir da consulta a base Scopus

Com relação ao quantitativo de patentes relacionadas ao grupo de palavras-chave I (Figura 6), observa-se que as principais áreas em que se inserem essas tecnologias são a Engenharia Elétrica, Instrumentos, Química e Engenharia Mecânica. Para as palavras-chave II e III, observa-se



que as mesmas áreas lideram no campo tecnológico. Essas áreas tecnológicas são facilmente relacionadas com as principais áreas do conhecimento relativas às publicações de artigos, demonstrando uma correlação entre esses resultados. A diversidade de áreas e de aplicações em que esses materiais podem ser empregados para produção tecnológica é ampla e multidisciplinar, podendo envolver pesquisadores de diversos campos em uma única pesquisa.

**Figura 6** – Quantitativo de patentes por área tecnológica relacionadas às palavras-chave I



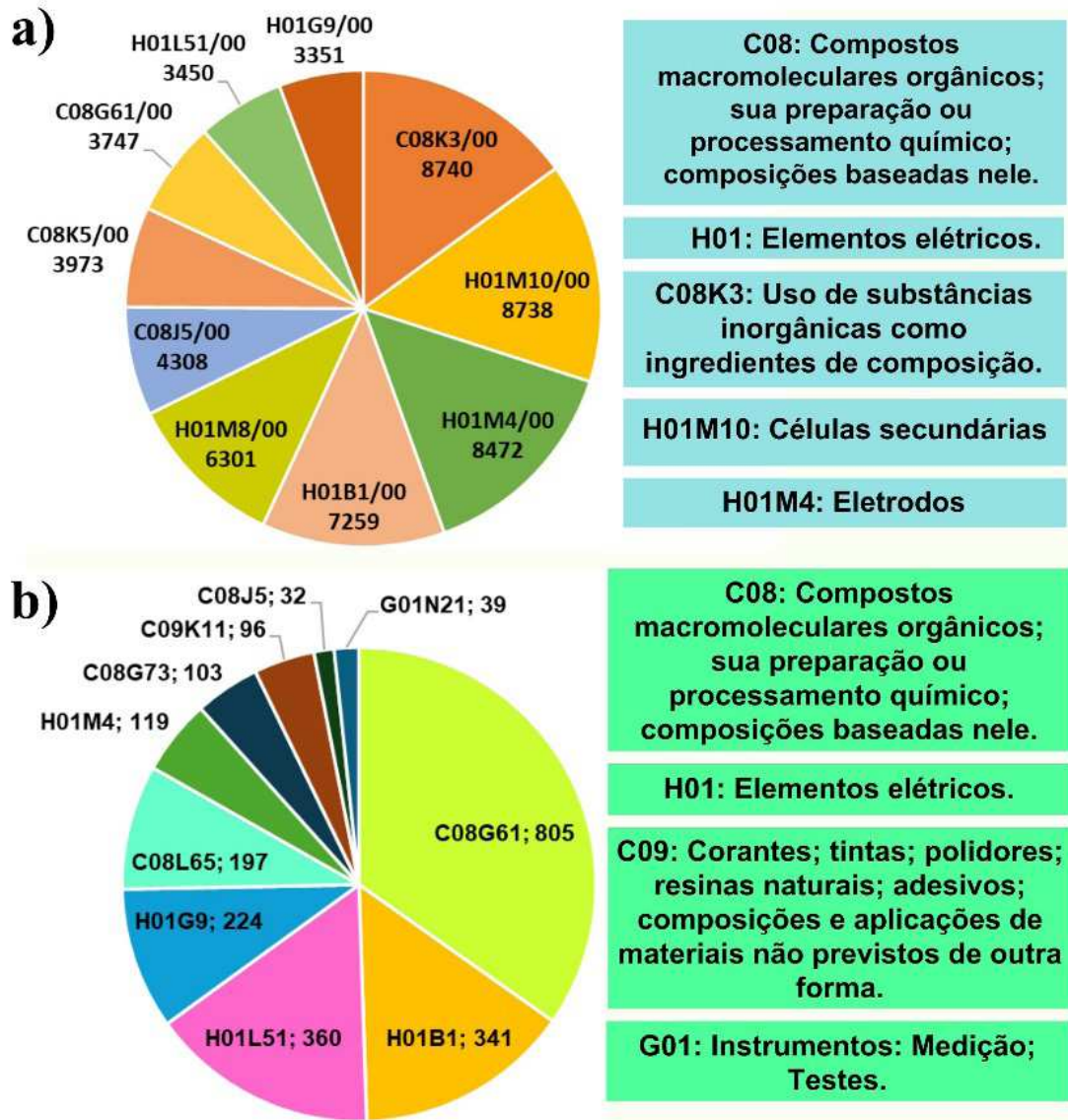
Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo a partir da consulta na base Patent Inspiration

Os resultados do quantitativo de patentes por áreas tecnológicas podem ainda ser relacionados com os códigos de Classificação Internacional de Patentes (CIP) – *International Patent Classification (IPC)* – (Figura 7). Para as pesquisas relacionadas ao grupo de palavras-chave I (Figura 7a), observa-se que as principais patentes estão relacionadas aos códigos C08 e H01. Sendo os códigos dos grupos principais mais recorrentes C08K3/00, H01M10/00 e H01M4. Para as demais palavras-chave (Figura 7b), os principais códigos são C08, H01, C09 e G01. Sendo os códigos dos grupos principais mais recorrentes C08G61 (compostos macromoleculares obtidos por reações, formando uma ligação carbono-carbono na cadeia principal da macromolécula), H01L51 (dispositivos de estado sólido que utilizam materiais orgânicos como parte ativa ou que utilizam uma combinação de materiais orgânicos com outros materiais como parte ativa) e H01B1 (condutores ou corpos condutores caracterizados pelos materiais condutores; seleção de materiais como condutores). Como pode ser observado, os códigos CIPs mais recorrentes nesses documentos estão diretamente relacionados às áreas de Química, Engenharia e Instrumentos.

Com os dados da busca, foram analisados alguns artigos e patentes referentes às palavras-chave mais específicas para avaliar as áreas de publicações dessas inovações e como a comunidade científica tem explorado esses materiais. Em relação às patentes, foram analisadas as palavras-chaves V, VI, VIII e IX na Patentscope (WIPO). Para a palavra-chave V, foram encontradas oito patentes que envolvem os polímeros conjugados fluorescentes do grupo dos tiofenos, sínteses e suas aplicações. As patentes relacionadas a essa palavra-chave mostram uma variedade de aplicações utilizando esses materiais como células solares, dispositivos eletrocromáticos, diodos emissores de luz orgânicos, sensores para explosivos, sensores para biomarcadores,

sensores para mercúrio etc. Para a palavra-chave VI, há um total de 24 patentes publicadas, com o desenvolvimento de polímeros fluorescentes baseados em fluoreno. Esses materiais desenvolvidos estão relacionados em muitas aplicações, sendo predominante o preparo de sensores, dispositivos eletroluminescentes e células solares.

**Figura 7** – Quantitativo de patentes por código CIP relacionadas às palavras-chave I (a), II e XI (b)



Fonte: Elaborada pelos autores deste artigo a partir da consulta na base Patent Inspiration

As palavras-chave VIII e IX referem-se ao uso dos tiofenos e dos fluorenos com propriedade eletrocromática, respectivamente. Para a palavra-chave VIII, foram encontradas 46 patentes, e, para a IX, foram obtidas cinco patentes, praticamente todas convergem para uma mesma área de aplicação tecnológica que é o desenvolvimento de dispositivos eletrocromáticos. Entre as cinco patentes da palavra-chave IX, a patente CN108623790 (Haijun *et al.*, 2018) descreve a possibilidade de uso do material desenvolvido em diversas aplicações, como um dispositivo eletrocromático, sensor fluorescente, material de antifalsificação e dispositivo para detectar explosivos. Com essa busca, foi observada uma diferença significativa na quantidade de patentes publicadas para cada caso, indicando que os tiofenos são mais explorados em termos de ele-

trocromismo, enquanto os fluorenos são mais explorados em termos de fluorescência, pois as propriedades químicas predominantes do material influenciam no seu campo de estudo e de desenvolvimento.

Uma diferença na tendência de publicação entre artigos e patentes das palavras-chave VIII e IX pode indicar que os pesquisadores priorizaram a proteção das ideias para os materiais desenvolvidos com tiofeno, sendo necessário para o fluoreno estudos mais completos para o desenvolvimento de patentes. Além disso, é importante destacar que todas as patentes, para as quatro palavras-chaves descritas, foram depositadas e publicadas dentro das áreas de química, metalurgia, física e eletricidade, de acordo com os códigos CIPs indicados nas bases, o que está em concordância com os gráficos de quantitativo de patentes por áreas e por códigos CIPs já discutidos anteriormente neste trabalho.

Com relação aos artigos, foi verificado que para a palavra-chave XI, que aborda o uso do poli(bistiofeno-fluoreno), há apenas três artigos publicados com um intervalo de tempo de publicação significativo e com finalidade de aplicação diferente. O artigo publicado por Tkachov *et al.* (2014) apresenta a síntese de um copolímero destinado a aplicações optoeletrônicas, entretanto, o copolímero sintetizado possui em sua estrutura um grupo naftalenodiimida além do bistiofeno e do fluoreno, ou seja, é um artigo que possui relação com o material de interesse deste trabalho, mas não se trata do mesmo material. Nogueira *et al.* (2019) estudaram filmes finos de poli(bistiofeno-fluoreno) obtidos eletroquimicamente. Esses filmes foram avaliados em termos de comportamento elétrico e óptico, pois, além de ser um material condutor apresenta a propriedade eletrocromica e fluorescente. O artigo desses autores aponta o uso do poli(bistiofeno-fluoreno) como material de potencial aplicação em dispositivos eletrocromicos de alta eficiência. Celik e Soylemez (2023) desenvolveram um biossensor modificando o poli(bistiofeno-fluoreno) com acetilcolinesterase (AChE). O poli(bistiofeno-fluoreno) foi obtido de uma maneira semelhante aos filmes desenvolvidos por Nogueira *et al.* (2019), por eletrodeposição, seguido da modificação com AChE, esse material foi testado como biossensor para detecção de paraoxon. As poucas publicações encontradas para a palavra-chave XI mostram a lacuna que ainda existe sobre o poli(bistiofeno-fluoreno) na literatura, isto é, quanto há para explorar sobre esse material. Além disso, as aplicações apontadas pelos artigos indicam que esse material pode ser ajustado de diferentes formas, o que o torna potencial para uma ampla gama de aplicações em diversos campos tecnológicos.

## 4 Considerações Finais

O quantitativo de artigos encontrados neste estudo de prospecção indica que a área de polímeros conjugados tem despertado cada vez mais o interesse da comunidade científica, em diversas áreas de conhecimento, em especial, na área de Química e de Ciência de Materiais, com um aumento anual significativo de publicações ao longo da última década. Somado a isso, o quantitativo de patentes expõe um interesse considerável em proteger as inovações utilizando polímeros conjugados, chegando a mais de 4.000 patentes publicadas no ano de 2023. Além disso, a distribuição das publicações (artigos e patentes) por países mostra a liderança no *ranking* mundial sendo ocupada por Japão, China, Estados Unidos e Índia, o que aponta para um

interesse maior desses países no desenvolvimento de tecnologias com polímeros conjugados. Entretanto, mesmo com todo o interesse da comunidade científica nessa área, há um número limitado de artigos e de patentes para polímeros derivados do tiofeno e do fluoreno, especificamente o poli(fluoreno-bistiofeno), indicando que há um espaço a ser preenchido nessa linha de pesquisa. Tendo em vista a existência dessa lacuna de conhecimento e o potencial de aplicação desse material apresentado nos três artigos encontrados, observa-se a necessidade de aumentar o interesse nacional nessa área com o desenvolvimento de novos trabalhos, do ponto de vista social, científico e econômico e para a importância de estudar, conhecer e desenvolver tecnologias inovadoras a partir do poli(fluoreno-bistiofeno).

## 5 Perspectivas Futuras

Diante das lacunas apresentadas sobre as pesquisas do poli(bistiofeno-fluoreno), pretende-se continuar as pesquisas que já estão em andamento na área de química orgânica e eletroquímica para avaliar de forma mais completa o comportamento desse material e explorar as possibilidades de inovação. Com isso, pretende-se também promover a produção de artigos e de patentes que contribuam no âmbito acadêmico e social do ponto de vista científico e tecnológico.

## Referências

- CARBAS, B. B.; YILDIZ, H. B. A review of dithieno[3,2-b:2',3'-d]pyrrole-based electrochromic conjugated polymers. **European Polymer Journal**, [s.l.], v. 204, p. 112700, 2024. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2023.112700.
- CELIK, H.; SOYLEMEZ, S. An Electrochemical Acetylcholinesterase Biosensor Based on Fluorene(bisthiophene) Comprising Polymer for Paraoxon Detection. **Electroanalysis**, [s.l.], v. 35, 2200271, 2023. DOI: 10.1002/elan.202200271.
- DONG, B.; SHI, T.; LU, Y. Multicolor conjugated polymers containing thiophene/indole moieties and the influence of structures on their photophysical properties. **Polymer**, [s.l.], v. 206, p. 122820, 2020. DOI: 10.1016/j.polymer.2020.122820.
- DUA, S. *et al.* Progress in Organic Coatings Conjugated polymer-based composites for anti-corrosion applications. **Progress in Organic Coatings**, [s.l.], v. 188, p. 108231, 2024. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2024.108231.
- FAN, Z. *et al.* Strongly fluorescent conjugated polymer nanoparticles in aqueous colloidal solution for universal, efficient and effective development of sebaceous and blood fingerprints. **Journal of Colloid and Interface Science**, [s.l.], v. 642, p. 658-668, 2023. DOI: 10.1016/j.jcis.2023.03.173.
- GMUCOVA, K. Structural properties versus electronic structure of donor-acceptor alternating copolymers: A review. **Synthetic Metals**, [s.l.], v. 274, p. 116718, 2021. DOI: 10.1016/j.synthmet.2021.116718.
- HAIJUN, N. *et al.* **Triarylated amine and fluorene unit containing conjugated polymer as well as preparation method and application of triarylated amine and fluorene unit containing conjugated polymer**. Depositante: Heilongjiang University. CN108623790. Depósito: 9 maio 2018.

JAYMAND, M.; HATAMZADEH, M.; OMIDI, Y. Modification of polythiophene by the incorporation of processable polymeric chains: Recent progress in synthesis and applications. **Progress in Polymer Science**, [s.l.], v. 47, p. 26-69, 2015. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2014.11.004.

KANEKO, Y.; WANG, A. Synthesis, acid-base responsive fluorescence, and ion-selectivity of novel  $\pi$ -conjugated polymers containing coumarin unit in the main chain. **Polymer**, [s.l.], v. 294, p. 126729, 2024. DOI: 10.1016/j.polymer.2024.126729.

LI, Z.; GONG, L. Research Progress on Applications of Polyaniline (PANI) for Electrochemical Energy Storage and Conversion. **Materials**, [s.l.], v. 13, n. 3, p. 548, 2020. DOI: 10.3390/ma13030548.

LIU, C. *et al.* Recent Progress in  $\pi$ -Conjugated Polymers for Organic Photovoltaics: Solar Cells and Photodetectors. **Progress in Polymer Science**, [s.l.], v. 143, p. 101711, 2023. DOI: 10.3390/polym14040716.

MANDAL, G.; BAURI, J.; CHOUDHARY, R. B. Conjugated polymeric nanocomposite-based light-generating active materials for OLED applications: A review. **Materials Science and Engineering: B**, [s.l.], v. 303, p. 117271, 2024.

NAMSHEER, K.; ROUT, C. S. Conducting polymers: a comprehensive review on recent advances in synthesis, properties and applications. **RSC Advances**, [s.l.], v. 11, n. 10, p. 5.659-5.697, 2021. DOI: 10.1039/d0ra07800j.

NOGUEIRA, F. A. R. *et al.* Transmissive to dark electrochromic and fluorescent device based on poly(fluorene-bisthiophene) derivative. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, [s.l.], v. 30, n. 12, p. 2.702-2.711, 2019. DOI: 10.21577/0103-5053.20190202.

QIN, M. *et al.* Redox-active anthraquinone-based  $\pi$ -conjugated polymer anode for high-capacity aqueous organic hybrid flow battery. **Journal of Energy Storage**, [s.l.], v. 72, p. 108642, 2023. DOI: 10.1016/j.est.2023.108642.

RAYAR, A. *et al.* Organic conjugated polymers and their nanostructured composites: Synthesis methodologies and electrochemical applications. **Nano-Structures and Nano-Objects**, [s.l.], v. 37, 2024. DOI:10.1016/j.nanoso.2024.101102.

RIBEIRO, A. S.; MORTIMER, R. J. Conjugated conducting polymers with electrochromic and fluorescent properties. **Electrochemistry**, [s.l.], v. 13, p. 21-49, 2016.

SAINI, Nishel; PANDEY, Kamakshi; AWASTHI, Kamendra. Conjugate polymer-based membranes for gas separation applications: current status and future prospects. **Materials Today Chemistry**, [s.l.], v. 22, p. 100558, 2021. DOI: 10.1016/j.mtchem.2021.100558.

SANTOS, A. P. L. A. *et al.* A “turn-off” fluorescent sensor based on electrospun polycaprolactone nanofibers and fluorene(bisthiophene) derivative for nitroaromatic explosive detection. **Forensic Science International**, [s.l.], v. 329, p. 111056, 2021. DOI: 10.1016/j.forsciint.2021.111056

SHIRAKAWA, H. *et al.* Synthesis of electrically conducting organic polymers: Halogen derivatives of polyacetylene, (CH)<sub>x</sub>. **Journal of the Chemical Society, Chemical Communications**, [s.l.], n. 16, p. 578-580, 1977.

SIWACH, P. *et al.* Recent progress in conjugated polymers composites with metal-organic frameworks as electrode materials for supercapacitors. **Applied Surface Science Advances**, [s.l.], v. 19, p. 100555, 1º fev. 2024. DOI: 10.1016/j.apsadv.2023.100555.

THE NOBEL PRIZE. **Nobel Prize Outreach AB 2024**. Wed. 3 Apr. 2024. Disponível em: <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2000/summary/>. Acesso em: 3 Apr. 2024.

TKACHOV, R. *et al.* One-Pot Synthesis of All Conjugated Block-Like Bisthiophene–Naphthalenediimide/Fluorene Copolymer. **Macromolecules**, [s.l.], v. 47, 4.994-5.001, 2014. DOI: 10.1021/ma5006588.

VAHDATIYEKTA, P. *et al.* A review on conjugated polymer-based electronic tongues. **Analytica Chimica Acta**, [s.l.], v. 1221, p. 340114-340114, 1º jun. 2022.

WEN, Y.; XU, J. Scientific Importance of Water-Processable PEDOT–PSS and Preparation, Challenge and New Application in Sensors of Its Film Electrode: A Review. **Journal of Polymer Science, Part A: Polymer Chemistry**, [s.l.], v. 55, p. 1.121-1.150, 2017. DOI: 10.1002/pola.28482.

YU, C. Y.; LIN, W. L. Preparation and characterization of alternating copolymers containing fluorene and thiophene derivatives. **European Polymer Journal**, [s.l.], v. 53, p. 246-252, 2014. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2014.02.002.

## Sobre os Autores

### Vitória Rocha de Oliveira

*E-mail:* vitoria.oliveira@iqb.ufal.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5369-0768>

Graduada em Licenciatura em Química.

Endereço profissional: Av. Lourival Melo Mota, s/n, Tabuleiro do Martins, Maceió, AL. CEP: 57072-970.

### Jeane Caroline da Silva Melo

*E-mail:* jeane.melo@iqb.ufal.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7623-4899>

Mestra em Ciências.

Endereço profissional: Av. Lourival Melo Mota, s/n, Tabuleiro do Martins, Maceió, AL. CEP: 57072-970.

### Fred Augusto Ribeiro Nogueira

*E-mail:* fred.nogueira@ifal.edu.br

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8969-151X>

Doutor em Ciências.

Endereço profissional: Rua Mizael Domingues, n. 530, Centro, Maceió, AL. CEP: 57020-600.

### Adriana Santos Ribeiro

*E-mail:* aribeiro@qui.ufal.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6109-9428>

Doutora em Química.

Endereço profissional: Av. Lourival Melo Mota, s/n, Tabuleiro do Martins, Maceió, AL. CEP: 57072-970.