

POLÍMEROS CONDUTORES NO BRASIL: EVOLUÇÃO CIENTÍFICA, CONTRIBUIÇÕES ACADÊMICAS E APLICAÇÕES DA POLIANILINA

Mike Ken Logan Ferreira Rodrigues¹; Rafaella Caroline Loubach²; Otto Henrique Cezar e Silva³.

¹Centro Universitário Única (Uniúnica), Ipatinga, Minas Gerais. <https://lattes.cnpq.br/0853333847767817>

¹Centro Universitário Única (Uniúnica), Ipatinga, Minas Gerais. <https://lattes.cnpq.br/9158655851256626>

¹Centro Universitário Única (Uniúnica), Ipatinga, Minas Gerais. <https://lattes.cnpq.br/7755512206435675>

PALAVRAS-CHAVE: Condutividade. Impedância. Deformação.

DOI: 10.47094/ICOLUBRAPECI.2026/RE-16

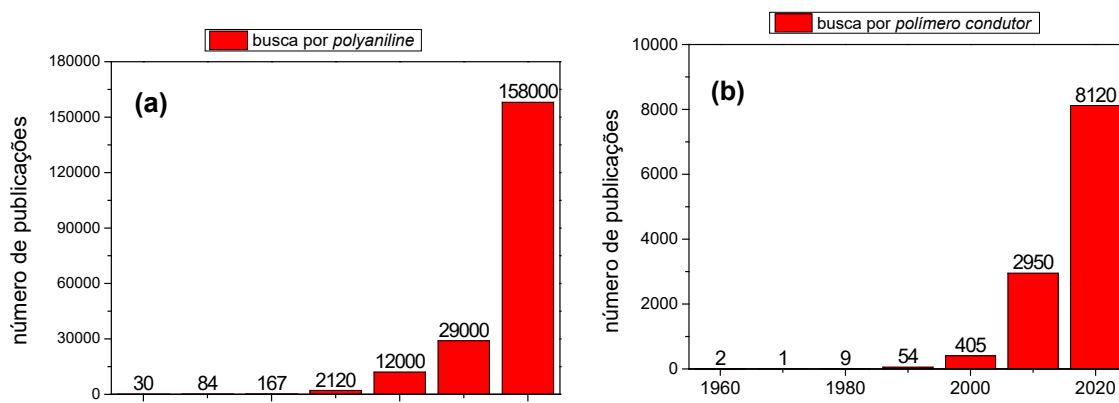
INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, uma classe específica de materiais poliméricos tem sido amplamente investigada. Esse interesse deve-se, principalmente, à descoberta de que tais materiais podem apresentar propriedades condutoras. Essa observação ocorreu em meados da década de 1970, quando os cientistas Hideki Shirakawa, Alan MacDiarmid e Alan Heeger identificaram a condutividade elétrica em filmes de poliacetileno dopado. A relevância desse trabalho foi reconhecida em 2000, com a concessão do Prêmio Nobel de Química aos referidos pesquisadores.

Entre esses materiais, destaca-se a polianilina (PANI), amplamente estudada devido à disponibilidade de seu monômero, à relativa facilidade de síntese e à sua estabilidade química. Além disso, diferentemente dos semicondutores inorgânicos tradicionais, esse material apresenta elevada flexibilidade mecânica (SOUZA JR *et al.*, 2022). Ademais, a PANI pode exibir boa condutividade elétrica, especialmente em sua forma dopada, conhecida como fase esmeraldina. Dessa forma, a combinação dessas propriedades torna esse polímero um candidato promissor para uma ampla gama de aplicações tecnológicas.

O interesse pelo desenvolvimento de polímeros condutores, em especial pela polianilina, tem crescido de forma expressiva nas últimas décadas. A partir de buscas em bases de dados acadêmicas, como o Google Scholar, observa-se, conforme apresentado na Figura 1, um aumento significativo no número de publicações relacionadas aos temas “polyaniline” e “conducting polymers”. Nesse contexto, o presente trabalho propõe-se a investigar a trajetória de pesquisadores brasileiros que se destacaram e contribuíram de maneira relevante para o avanço do entendimento dos fenômenos de condução em polímeros conjugados.

Figura 1: Quantitativo de publicações no Google Acadêmico nas últimas décadas com buscas no Google Acadêmico com as palavras-chaves (a) *polyaniline* e (b) polímero condutor.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

OBJETIVO

Este artigo tem como objetivo apresentar uma revisão exploratória e histórica sobre o desenvolvimento dos polímeros condutores no Brasil, com ênfase na polianilina (PANI), destacando as principais contribuições científicas de pesquisadores brasileiros desde a década de 1990 até os dias atuais. Busca-se evidenciar a evolução dos estudos relacionados às propriedades elétricas, modelos teóricos de condução, métodos de síntese e caracterização, bem como aplicações tecnológicas em áreas como dispositivos eletroquímicos, optoeletrônicos e sensores. Adicionalmente, o trabalho pretende contextualizar a relevância científica desses estudos no cenário internacional e identificar tendências e perspectivas futuras para a pesquisa em polímeros condutores.

METODOLOGIA

A partir de uma abordagem exploratória, o desenvolvimento deste artigo seguiu as seguintes etapas. Inicialmente, realizou-se busca de publicações científicas em bases de dados nacionais e internacionais. Depois, procedeu-se a leitura crítica dos títulos com o intuito de compreender o escopo e a relevância dos trabalhos. Em seguida, foram considerados critérios como pertinência temática, período de publicação e qualidade dos periódicos. Adiante, os estudos foram sintetizados e levados à discussão em grupo, possibilitando a identificação de tendências, métodos e aplicações recorrentes. Por último, realizou-se a discussão dos resultados, confrontando as informações obtidas na literatura, de modo a evidenciar avanços, limitações e lacunas existentes, contribuindo para a consolidação do conhecimento na área investigada. A seguir, a Figura 2 representa de forma elaborada e resumida a metodologia narrada.

Figura 2: Este artigo foi desenvolvido utilizando a seguinte rota metodológica: busca; leitura, seleção, resultados e discussão.



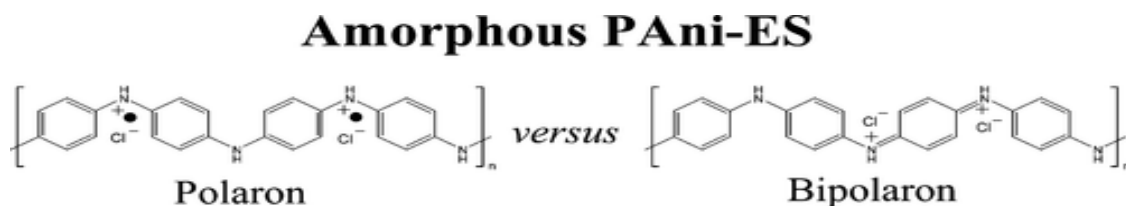
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em meados da segunda metade do século XX, alguns grupos de pesquisa no Brasil já investigavam as propriedades de materiais poliméricos. Um desses grupos, sediado na USP de São Carlos, era coordenado pelo Dr. Roberto M. Faria. Nesse contexto, no início da década de 1990, Nogueira *et al.* (1994) investigaram a condutividade de sistemas à base de polianilina sintetizada em conjunto com polimetoxianilina (PANI/POMA), sob condições de vácuo e umidade relativa de 70%. À época, o microfilme produzido apresentou estabilidade eletrônica em uma ampla faixa de frequência (10^{-2} a 10^5 Hz), com comportamento característico na região de baixas frequências e aumento aproximadamente linear da condutividade em frequências mais elevadas.

Outrossim, no início da década de 1990, De Paoli *et al.* (1991) comprovaram experimentalmente a capacidade condutora de blendas de polianilina com acetato de celulose (PANI/AC), em proporções variando entre 23% e 38% de PANI. As medidas evidenciaram variações significativas na ordem de grandeza da condutividade elétrica, situando-se entre 10^{-7} e 10^{-3} S·cm⁻¹. Além disso, o microfilme, quando exposto a meio eletroquímico, apresentou estabilidade em suas propriedades condutivas. A Figura 3 apresenta os estados eletrônicos associados às formas moleculares da PANI.

Figura 3: As formas polaronica e bipolaronica da sal esmeraldina da polianilina (PANI-ES) no estado sólido amorfo.



Fonte: Canales et al. (2014).

Nesse período significativo de desenvolvimento das pesquisas em polímeros condutores, Bianchi *et al.* (1999) discutem a espectroscopia de impedância como uma poderosa ferramenta para o estudo da condutividade eletrônica em materiais desordenados. A interpretação teórica dos resultados obtidos por essa técnica pode ser realizada com base no Teorema da Flutuação-Dissipação de Kubo, segundo o qual as propriedades elétricas do sistema estão relacionadas às flutuações microscópicas em equilíbrio, permitindo a descrição de sua resposta dinâmica. Nesse contexto, a formulação proposta por Jeppe C. Dyre descreve formalmente a resposta do sistema por meio de funções complexas, nas quais a impedância é tratada como uma grandeza dependente da frequência, composta por partes real e imaginária. Tal abordagem possibilita a modelagem do comportamento dielétrico e condutivo de materiais desordenados, como polímeros condutores (KUBO, 1996). Experimentalmente, a caracterização foi realizada por espectroscopia de impedância na faixa de frequência de 0,1 a 10^6 Hz, sob condições de vácuo e temperaturas entre 84 e 300 K, utilizando filmes finos de PANI dopados em HCl 0,1 M, com tempos de dopagem de 0, 1, 5, 15 e 20 minutos. Os resultados evidenciam as contribuições das componentes real e imaginária da condutividade e sua interdependência, em conformidade com as relações de Kramers-Kronig. Nesse cenário, o modelo de Barreira de Energia Livre Aleatória (BELA) mostrou-se consistente para a interpretação das curvas de impedância da PANI.

Neves e Fonseca (2004) demonstraram o potencial da PANI na fabricação de uma microbateria recarregável de baixo custo e com flexibilidade típica de materiais poliméricos. Para tal, foi desenvolvido um compósito de PANI-sílica atuando como cátodo, envolvido por um eletrólito em gel polimérico à base de poli (dimetilsiloxano-co-óxido de etileno) (P(DMS-co-EO)) dopado com LiClO_4 . O sistema PANI-Li apresentou elevada capacidade inicial ($140 \text{ mA}\cdot\text{h}\cdot\text{g}^{-1}$) e capacidade reversível de $75 \text{ mA}\cdot\text{h}\cdot\text{g}^{-1}$ após 100 ciclos de carga e descarga. Ademais, a condutividade eletrônica, da ordem de $2,6 \times 10^{-4} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$, mostrou-se suficientemente elevada para viabilizar os processos de dopagem e redução do sistema. Por fim, as medidas de impedância indicaram um desempenho superior em termos de ciclo de vida quando comparado a baterias secundárias de lítio.

Na década seguinte, Domingues *et al.* (2011) apresentaram um filme ultrafino de grafeno/PANI. Assim como o sistema ITO/PANI, esse material também despertou

interesse para a produção de dispositivos optoeletrônicos, devido à sua transparência. A deposição desse nanocompósito pode ocorrer sobre diferentes substratos, ampliando suas possibilidades de aplicação. Nesse contexto, a rota de obtenção empregada foi denominada polimerização interfacial, a qual envolve a diluição das amostras e, após centrifugação e repouso da mistura, promove a formação espontânea do filme na interface entre as fases aquosa e oleosa. A seguir, a **Tabela 1** apresenta um resumo das principais abordagens adotadas por pesquisadores brasileiros no desenvolvimento de dispositivos baseados em polímeros condutores.

Tabela 1: Pesquisadores nacional utilizaram diferentes caminhos quanto ao desenvolvimento de dispositivos poliméricos.

Autor	Métodos de Análise	Aplicação
Faria <i>et al.</i> 1994	<i>Condutividade sob umidade</i>	semicondutor
Neves e Fonseca 2004	<i>ciclos reversíveis de carga e descarga</i>	capacitor flexível
Domingues <i>et al.</i> 2011	<i>compósito com grafeno</i>	optoeletrônico
Kelmer <i>et al.</i> 2024	<i>alta estabilidade e sensibilidade a amônia e baixa sensibilidade à deformação</i>	sensor de amônia

Fonte: Faria *et al.* (1994), Neves e Fonseca (2004), Domingues *et al.* (2011), Kelmer *et al.* (2024).

Atualmente, a capacidade oxidativa da PANI foi investigada por Faria *et al.* (2020), a partir da fabricação de um dispositivo voltado à detecção de veneno de cobra. Nesse estudo, o polímero conjugado, em sua fase esmeraldina, foi depositado sobre um substrato condutor. Posteriormente, o dispositivo foi caracterizado por meio de ensaios de espectroscopia de impedância eletroquímica. A funcionalidade do sensor foi comprovada, uma vez que os resultados apresentaram comportamento linear na detecção do veneno de cobra, em concentrações variando de 0,1 a 10 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos realizados evidenciam que a polianilina permanece como um dos polímeros condutores mais relevantes no cenário científico atual, sobretudo em função de sua versatilidade e propriedades ajustáveis. Estudos recentes demonstram que há uma tendência crescente no número de publicações relacionadas a esse material, com destaque para aplicações em sensores, dispositivos de armazenamento de energia e sistemas eletroquímicos (SOUZA JR, 2020). Tal panorama reforça o papel estratégico da polianilina

no desenvolvimento de tecnologias emergentes, especialmente no contexto de materiais funcionais e inteligentes.

Adicionalmente, observa-se que avanços significativos têm sido obtidos por meio da incorporação de nanopartículas, resultando em melhorias substanciais na condutividade elétrica e no desempenho funcional desses sistemas. A meta-análise conduzida por Souza Jr *et al.* (2022) indica que a modificação estrutural em escala nanométrica constitui uma das principais direções futuras para a área, ampliando o potencial de aplicação da polianilina em dispositivos mais eficientes e sustentáveis. Dessa forma, considera-se que a continuidade das pesquisas, aliada à integração com nanotecnologia, será determinante para consolidar o uso desses materiais em aplicações industriais e tecnológicas de maior impacto.

PRINCIPAIS REFERÊNCIAS

KUBO, R. **The fluctuation-dissipation theorem.** Reports on Progress in Physics, v. 29, n. 1, p. 255–284, 1966.

SHIRAKAWA, H.; LOUIS, E. J.; MACDIARMID, A. G.; CHIANG, C. K.; HEEGER, A. J. **Synthesis of electrically conducting organic polymers: halogen derivatives of polyacetylene, (CH)_x.** Journal of the Chemical Society, Chemical Communications, n. 16, p. 578–580, 1977.

TASSI, E.; DE PAOLI, M.-A. **A conductive and electroactive elastomer: a polyaniline/nitrilic rubber composite.** Journal of the Chemical Society, Chemical Communications, v. 1990, p. 155–156, 1990.

DE PAOLI, M.-A.; DUEK, E. R. **Poly(Aniline)/cellulose acetate composites: conductivity and electrochromic properties.** Synthetic Metals, v. 41, p. 973–978, 1991.

FARIA, R. M.; LEPIENSKI, C. M.; NOGUEIRA, J. S.; MATTOSO, L. H. C. **Effect of humidity on ac conductivity of polyaniline and poly(o-methoxyaniline).** Journal of the Brazilian Chemical Society, v. 15, p. 209–213, 1994.

AMARAL, T. P., BARRA, G. M. O., BARCIA, F. L., & SOARES, B. G. (2001). **Estudo das Propriedades de Compósitos de Polianilina e Resina Epoxídica.** Polímeros, 11(3), 149–157.

NEVES, S.; FONSECA, C. P. **Mixed solid device based on conducting polymer composite and polymer electrolyte.** Journal of the Brazilian Chemical Society, v. 15, n. 3, p. 395–399, 2004.

SIMÕES, F. R.; BULHÕES, L. O. S.; PEREIRA, E. C. **Synthesis and characterization of conducting composites of polyaniline and carbon black with high thermal stability.** Polímeros, v. 19, n. 1, p. 54–57, 2009.

DOMINGUES, S. H.; SALVATIERRA, R. V.; OLIVEIRA, M. M.; ZARBIN, A. J. G. **Transparent and conductive thin films of graphene/polyaniline nanocomposites prepared through interfacial polymerization.** Chemical Communications, v. 47, n. 9, p. 2592–2594, 2011.

BIANCHI, R. F.; FERREIRA, G. F. L.; LEPIENSKI, C. M.; FARIA, R. M. **Alternating electrical conductivity of polyaniline.** Journal of Chemical Physics, v. 110, n. 9, p. 4602–4607, 1999.

SOUZA JR., F. G. **Polyaniline: trends and perspectives from text mining analysis.** Brazilian Journal of Experimental Design, Data Analysis and Inferential Statistics, v. 1, n. 1, 2020.

FARIA, R. A. D. DE; SOUZA, P. H. C. DE; LINS, V. F. C.; MATENCIO, T.; HENEINE, L. G. D. **Label-free impedimetric immunosensors for detection of snake venoms using polyaniline as a transducer substrate.** Biomedical Journal of Scientific & Technical Research, v. 25, n. 3, 2020.

SOUZA JR., F. G.; BARRADAS, T. N.; CAETANO, V. F.; BECERRA, A. **Can nanoparticles improve polyaniline electrical conductivity? — A meta-analysis study.** Brazilian Journal of Experimental Design, Data Analysis and Inferential Statistics, v. 2, n. 1, 2022.

KELMER, A. C.; COSTA, C. C.; BIANCHI, R. F. **All-polymer-based ammonia gas sensor: applying insights from the morphology-driven ac electrical performance.** Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. 34, p. 1–1, 2024.