

DESENVOLVIMENTO DE PROGRAMA PARA MEDIÇÃO AUTOMÁTICA DE DIÂMETROS DE NANOFIBRAS EM IMAGENS DIGITAIS¹

SOUSA, Gustavo Nascimento de²
PIRES, Ricardo³
OLIVEIRA, Claudia Almerinda de Souza⁴
BONVENT, Jean-Jacques⁵

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e implementação de um programa computacional para a medição automática do diâmetro médio de nanofibras, estruturas com propriedades elétricas, mecânicas, biológicas ou químicas diferenciadas devido à sua escala nanométrica. O objetivo principal foi reduzir o tempo necessário e minimizar erros comuns nas medições manuais tradicionais. Para isso, foi desenvolvido um algoritmo em Python que utiliza técnicas de processamento de imagem, incluindo filtro gaussiano, binarização adaptativa e operações morfológicas para segmentar e analisar as fibras de forma precisa. Resultados parciais, comparados com medições manuais, indicam boa acurácia, demonstrando a viabilidade do algoritmo proposto.

Palavras-chave: nanofibras, visão computacional, processamento de imagens, medição automatizada.

INTRODUÇÃO

A Nanociência e a Nanotecnologia são a junção de várias áreas do conhecimento que agem na manipulação, desenvolvimento e produção de materiais e estruturas na ordem de nanômetros, com características diferenciadas quando comparados àqueles na escala macroscópica. Dentre eles, estão as nanofibras, com funções elétricas, mecânicas, biológicas ou químicas devidas a esse tamanho (Nalli, 2009).

Para viabilizar as aplicações das nanofibras, é necessário investigar as suas propriedades, usando diferentes técnicas de caracterização. Para avaliação das propriedades morfológicas, incluindo diâmetro da secção, distribuição do diâmetro, orientação e rugosidade, técnicas microscópicas são amplamente empregadas. A determinação do diâmetro é feita com o auxílio de programas de análise de imagens, dentre os quais o ImageJ (Health, 2025) tem sido o mais empregado. Mas, seus usuários relatam a realização de 50 a 100 medições manuais para se obter o diâmetro médio de um conjunto de nanofibras, o que gera algumas inconsistências e erros de medição devido ao programa não ser totalmente automatizado, além de requerer um tempo excessivo (Mercante et al, 2021).

OBJETIVOS

¹ Projeto de Iniciação Científica - Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica e Tecnológica do IFSP (PIBIFSP).

² Graduando em Engenharia Eletrônica; IFSP-SPO; São Paulo; SP; sousa.nascimento@aluno.ifsp.edu.br.

³ Doutor em Sistemas Automáticos e Microeletrônicos pela UM2; Montpellier; França; ricardo_pires@ifsp.edu.br.

⁴ Doutoranda em Biotecnociência; UFABC; Santo André; SP; csoliveira@ifsp.edu.br.

⁵ Doutor em Físico-Química; CRPP; Bordeaux; França; jean.bonvent@ufabc.edu.br.

O objetivo deste projeto é a elaboração de um programa computacional para a automatização da medição do diâmetro médio de nanofibras em imagens digitais.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Numa pesquisa bibliográfica por trabalhos com temas próximos, verificou-se que Miao, Li, Chen (2016) propuseram um método para recuperar imagens tridimensionais de nanofibras usando análise teórica e simulações Monte Carlo de imagens bidimensionais obtidas por microscópio eletrônico de transmissão. Reneker et al. (2015) mostraram que a micrografia eletrônica em escala atômica de moléculas de fluoreto de polivinilideno em nanofibras finas revelaram torção em torno dos eixos de cadeias moleculares e outros fenômenos estruturais e dinâmicos. Keloth et al. (2015) demonstraram um método para fazer medições do diâmetro de fibras ópticas cônicas com diâmetros de subcomprimento de onda, criando-se uma cavidade de cristal fotônico e montando-se uma grade em uma nanofibra óptica. A cavidade teve um comprimento de onda de ressonância sensível ao diâmetro da nanofibra, permitindo que ele fosse inferido a partir de medições ópticas. Zhu et al. (2018) apresentaram um método para a medição precisa e *in situ* do diâmetro de nanofibras ópticas, usando uma grade de período micrométrico comercial formando um refletor Bragg, possibilitando um diagnóstico conveniente do diâmetro das nanofibras. Porém, nenhum destes trabalhos objetivou medir os diâmetros das nanofibras automaticamente em imagens digitais.

Hotaling et al. (2015) desenvolveram um *plugin* de código aberto para o programa ImageJ, chamado DiameterJ, para a medição de diâmetros de nanofibras em imagens. A justificativa foi a existência, naquele momento, de apenas dois programas disponíveis comercialmente, custando de dezenas a centenas de milhares de dólares, os quais não eram de código aberto, não podendo ser visualizados, nem modificados pelos usuários. O procedimento usado pelo DiameterJ se iniciava usando um dos vários *plugins* de segmentação de imagens disponíveis no ImageJ para separar as fibras do fundo da imagem, gerando uma imagem com pixels brancos onde havia fibras e pixels pretos no fundo. Em seguida, era usada uma abordagem chamada Super Pixel, a qual produz um único valor de diâmetro médio de fibra para cada imagem. Ela divide a área de todas as fibras em uma imagem pelo comprimento total de todas as linhas centrais das fibras. Nesse cálculo, o número de *pixels* brancos era considerado a medida da área total das fibras. Linhas centrais eram calculadas para as nanofibras, usando uma tesselação de Voronoi que foi construída com base em grupos conectados dos *pixels* pretos. A área total das fibras era dividida pela soma de seus comprimentos, dando aproximações para o valor médio do diâmetro. Porém, com a evolução do programa ImageJ, o *plugin* DiameterJ perdeu a compatibilidade com ele, deixando de ser uma solução para a medição dos diâmetros.

Yu, Gao e Tan (2024) alegam ter publicado o primeiro trabalho de caracterização de nanofibras com processamento automático de múltiplas imagens delas em diferentes escalas e com seu dimensionamento usando aprendizado profundo. A ferramenta proposta mede a distribuição de diâmetros de nanofibras eletrofiadas. Porém, técnicas de aprendizado profundo requerem grandes quantidades de exemplos para treinamento e recursos computacionais com capacidade relativamente elevada em relação aos de técnicas convencionais de processamento de imagens, o que justifica a preferência por estas últimas no presente trabalho.

Em sistemas computacionais, as imagens digitais são representadas sob a forma de matrizes de *pixels* (*picture elements*) (Gonzalez; Woods, 2009). Em imagens coloridas, cada *pixel* é comumente descrito por três valores inteiros correspondentes às intensidades das componentes vermelho, verde e azul (RGB). Nas imagens em tons de cinza, cada pixel é representado por um único valor numérico proporcional à sua

claridade, variando, comumente, entre 0 (preto) e 255 (branco), com valores intermediários representando diferentes níveis de luminosidade. Esta representação facilita a aplicação de filtros, limiarização e operações morfológicas, amplamente utilizadas na extração de informações relevantes na análise de imagens digitais.

Em processamento de imagens, a operação de filtragem consiste em se obter uma imagem B a partir de uma imagem A, sendo que o valor de cada *pixel* em B pode ser calculado como uma média ponderada dos valores do *pixel* na mesma posição em A e valores dos *pixels* de sua vizinhança em A. O filtro gaussiano atribui ao *pixel* de seu centro um certo peso e atribui aos *pixels* da sua vizinhança pesos segundo uma queda gaussiana do peso central, conforme sua distância ao *pixel* central. Isso suaviza imagens, atenuando ruído. A operação de binarização é aquela que substitui o valor de cada *pixel* numa imagem em escala de cinza por branco ou preto, dependendo de aquele valor estar acima ou abaixo de um valor de limiar. Em sua versão adaptativa, o limiar é calculado localmente para diferentes regiões da imagem, com base nas distribuições locais de intensidades. Uma operação de erosão substitui o valor de cada *pixel* de uma imagem pelo valor mínimo de uma região em torno dele, enquanto que uma operação de dilatação o substitui pelo valor máximo daquela região. A operação de esqueletização identifica linhas centrais que definem a estrutura de objetos em imagens, à semelhança de esqueletos de organismos. Estas últimas operações são chamadas de filtros morfológicos (Gonzalez; Woods, 2009).

METODOLOGIA

As imagens de nanofibras utilizadas neste trabalho foram obtidas no Laboratório de Cristalografia e Caracterização Estrutural de Materiais da Universidade Federal do ABC (UFABC). Elas foram rotuladas manualmente com os valores médios dos diâmetros das suas nanofibras, para validação dos resultados obtidos por meio do programa proposto.

O programa foi desenvolvido em linguagem Python (Foundation, 2025), devido à sua ampla difusão, documentação acessível e compatibilidade com pacotes de software específicos para processamento de matrizes e de imagens digitais, como o NumPy (Team, 2025a) e o OpenCV (Team, 2025b).

Inicialmente, realiza-se a leitura da imagem original, obtida por meio de técnicas de microscopia eletrônica. Essas imagens frequentemente apresentam legendas na região inferior, que, apesar de informativas, podem comprometer a acurácia do cálculo do diâmetro médio das nanofibras. Por essa razão, procede-se à remoção dessas legendas, eliminando todas as linhas localizadas abaixo da primeira linha horizontal completamente preta da imagem. A imagem original apresenta uma resolução de 5120×3840 *pixels*. Visando a otimização do desempenho computacional nas etapas seguintes, reduz-se a escala para 10% do tamanho original, obtendo-se 512×384 *pixels*.

Na sequência, são aplicadas técnicas de processamento digital de imagens, incluindo o corte, a redução e a conversão para escala de cinza, etapa que simplifica a aplicação dos algoritmos subsequentes.

Um filtro gaussiano é aplicado para suavizar a imagem, reduzindo o ruído, como ilustrado na primeira subimagem da Figura 1. Em seguida, realiza-se a binarização por limiarização binária adaptativa, realçando as características de interesse presentes na imagem. Na etapa 3, referente aos filtros morfológicos, aplica-se inicialmente a erosão, que refina as formas ao reduzir as bordas dos objetos e remover detalhes indesejados. Depois, utiliza-se a dilatação, com o objetivo de expandir os objetos, preenchendo lacunas e interconectando *pixels* próximos. Os resultados dessas operações estão apresentados na Figura 1.

Figura 1 - Etapas de processamento da imagem.

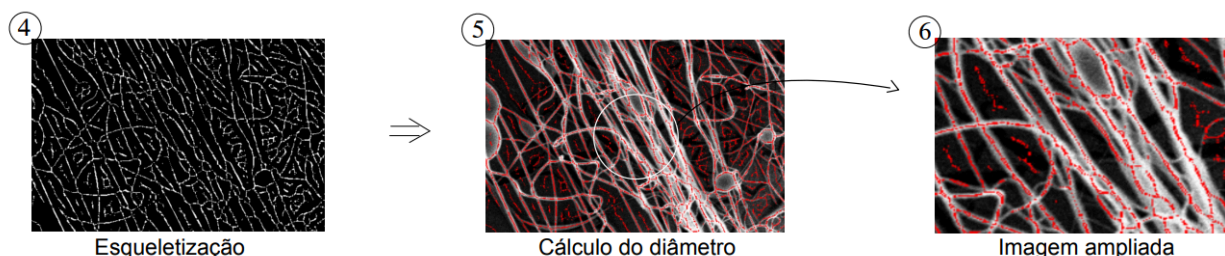


Fonte: Autores.

Na etapa final, realiza-se a esqueletização da imagem, seguida do cálculo do diâmetro médio das nanofibras, conforme exemplificado na Figura 2. Essa fase permite estimar a espessura média das estruturas analisadas, a partir da razão entre a área total (em branco) das fibras binarizadas e o comprimento total do esqueleto gerado (linhas vermelhas). Como ilustrado na etapa 4, essa representação simplificada permite a extração de informações geométricas, por meio de traçados com espessura de um *pixel* por fibra, facilitando o cálculo do comprimento total das fibras.

A partir da imagem esqueletizada, calcula-se o diâmetro médio das nanofibras considerando a razão entre a área da imagem processada após aplicação do filtro morfológico, ou seja, o número total de *pixels* que compõem as fibras, e o comprimento total do esqueleto, representado pela quantidade de *pixels* ao longo das linhas centrais. Como ilustrado na etapa 5 e na etapa 6, com a imagem ampliada, os resultados são sobrepostos visualmente à imagem original, com as linhas das fibras destacadas em vermelho, permitindo a verificação qualitativa da medição realizada.

Figura 2 - Etapas finais de processamento da imagem.

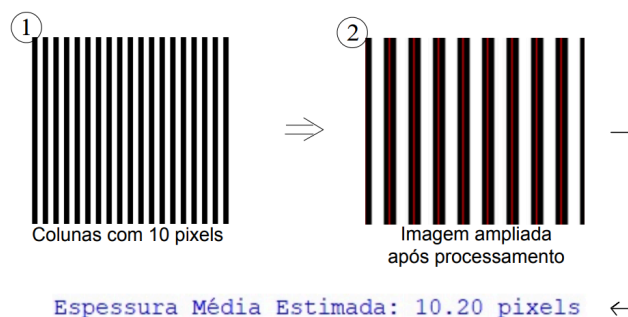


Fonte: Autores.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram conduzidos experimentos com imagens padrão contendo barras verticais de larguras conhecidas, utilizadas para calibração, conforme exemplificado na Figura 3. Um algoritmo foi desenvolvido para gerar automaticamente essas imagens (subimagem 1) e verificar a acurácia do sistema de medição. Os resultados mostraram boa coerência com os valores esperados, por exemplo, colunas de 10 *pixels* foram medidas com média de 10,20 *pixels*. Também foram realizados testes com imagens reais de nanofibras fornecidas pelo laboratório, com baixo erro em relação às medições manuais. Porém, os resultados das medições ainda são dados em *pixels*. A próxima etapa do trabalho será a apresentação dos resultados em nanômetros. Para isso, será necessária a leitura, pelo programa, de uma indicação de escala presente na parte inferior de cada imagem.

Figura 3 - Imagens utilizadas para treinamento do algoritmo.



Fonte: Autores.

CONSIDERAÇÕES FINAIS/CONCLUSÃO

Os resultados parciais obtidos demonstram que o algoritmo desenvolvido é eficaz para a medição automatizada do diâmetro médio de nanofibras, com boa acurácia em imagens padrão e baixo erro em imagens reais. Está em desenvolvimento a detecção da barra indicadora de escala presente nas imagens, o que permitirá a conversão dos valores de pixels para micrômetros ou nanômetros. Também está sendo implementada uma interface gráfica para facilitar o uso do programa pelo pessoal de Nanotecnologia.

REFERÊNCIAS

- FOUNDATION, Python Software. **Python**. 2025. Disponível em: <https://www.python.org/> . Acesso em: 16 jul. 2025.
- FOUNDATION, Python Software. **tkinter — Interface Python para Tcl/Tk**. 2025. Disponível em: <https://docs.python.org/pt-br/3/library/tkinter.html> . Acesso em: 16 jul. 2025.
- GONZALEZ, Rafael C.; WOODS, Richard E. **Digital image processing**. Índia: Pearson Education, 2009.
- HEALTH, N. I. of. **About NIH Image**. Disponível em: <https://imagej.net/nih-image/about.html> . Acesso em 17 jul. 2025.
- HOTALING, N. A. et al. **DiameterJ: A validated open source nanofiber diameter measurement tool**. Biomaterials, Elsevier, v. 61, p. 327-338, 2015.
- KELOTH, J. et al. **Diameter measurement of optical nanofibers using a composite photonic crystal cavity**. Optics Letters. Optica Publishing Group, v. 40, n. 17, p. 4122-4125, 2015.
- MERCANTE, L. A. et al. **Nanofibras eletrofiadas e suas aplicações: avanços na última década**. Química Nova, SciELO Brasil, v. 44, n. 6, p. 717736, 2021.
- MIAO, H.; LI, J.; CHEN, D. **Recovering 3d images of polymeric nanofibers in solution through theoretical analysis and monte-carlo simulations of their 2d tem images**. Soft Matter. Royal Society of Chemistry, v. 12, n. 20, p. 4590-4594, 2016.
- NALLI, M. **Quando as tecnologias embaralham nossas vidas: as nanotecnologias**. Estudios sociales. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo AC, v. 17, n. 34, p. 277-292, 2009.
- TEAM, NumPy. **NumPy – The fundamental package for scientific computing with Python**. 2025. Disponível em: <https://numpy.org/> . Acesso em: 16 jul. 2025.
- TEAM, OpenCV. **OpenCV**. 2025. Disponível em: <https://opencv.org/> . Acesso em: 16 jul. 2025.
- YU, H.; GAO, E.; TAN, Z. **Automated nanofibre sizing by multi-image processing and deep learning with revised UNET model**. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Wiley Online Library, v. 102, n. 4, p. 1441-1453, 2024.
- ZHU, M. et al. **Diameter measurement of optical nanofibers by using a commercial and standardized ruled grating**. In: Optica publishing group. Conference on Lasers and Electro-Optics / Pacific Rim. [S.l.], 2018. p. W4E-3.