

Caracterización de la topografía superficial de polímeros con potencial triboeléctrico mediante Microscopía de Fuerza Atómica

RESUMEN: Los nanogeneradores triboeléctricos (TENG) representan una alternativa prometedora para la generación de energía verde a partir de estímulos mecánicos de baja frecuencia. Su desempeño depende tanto de la afinidad electrónica de los materiales como de su topografía a escala nanométrica. En este estudio, bajo un enfoque descriptivo y comparativo, se caracterizó la rugosidad superficial de politetrafluoroetileno (PTFE), silicona y polipropileno (PP) mediante Microscopía de Fuerza Atómica (AFM) en modo "tapping", realizando escaneos de $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ y calculando los parámetros de rugosidad promedio (R_a) y rugosidad cuadrática media (R_q). Los resultados mostraron que el PTFE presentó los valores más elevados ($R_a = 131\ \text{nm}$; $R_q = 164\ \text{nm}$), seguido del PP ($R_a = 84.1\ \text{nm}$; $R_q = 105\ \text{nm}$), mientras que la silicona registró la menor rugosidad ($R_a = 27.4\ \text{nm}$; $R_q = 34.3\ \text{nm}$). Estas diferencias topográficas evidencian que la rugosidad superficial constituye un parámetro físico relevante en la estimación del potencial triboeléctrico. El principal aporte del estudio radica en demostrar que el análisis cuantitativo de rugosidad mediante AFM complementa la serie triboeléctrica como criterio de selección de materiales, fortaleciendo el diseño de TENGs para la generación de energía sustentable.

PALABRAS CLAVE: Nanogeneradores triboeléctricos; Microscopía de Fuerza Atómica; Rugosidad superficial; Polímeros; Energía verde.



Colaboración

Antia Ivett Álvarez Bernabé, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Misantla; Agustín Leobardo Herrera May, Centro de investigación en micro y nanotecnología; María Cristina López Méndez, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Misantla, Juan Vicente Méndez Méndez; Israel Arzate Vázquez, Centro de Nanociencias y Micro y nanotecnologías

Fecha de recepción: 12 de diciembre de 2025

Fecha de aceptación: 18 de diciembre de 2025

ABSTRACT: Triboelectric nanogenerators (TENGs) represent a promising alternative for generating green energy from low-frequency mechanical stimuli. Their performance depends on both the electron affinity of the materials and their topography at the nanoscale. In this study, using a descriptive and comparative approach, the surface roughness of polytetrafluoroethylene (PTFE), silicone, and polypropylene (PP) was characterized by Atomic Force Microscopy (AFM) in tapping mode, performing $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ scans and calculating the average roughness (R_a) and root mean square roughness (R_q) parameters. The results showed that PTFE exhibited the highest values ($R_a = 131\ \text{nm}$; $R_q = 164\ \text{nm}$), followed by PP ($R_a = 84.1\ \text{nm}$; $R_q = 105\ \text{nm}$), while silicone registered the lowest roughness ($R_a = 27.4\ \text{nm}$; $R_q = 34.3\ \text{nm}$). These topographical differences demonstrate that surface roughness is a relevant physical parameter in estimating triboelectric potential. The main contribution of this study lies in showing that quantitative roughness analysis using AFM complements the triboelectric series as a material selection criterion, strengthening the rational design of portable TENGs geared towards sustainable energy generation.

KEYWORDS: Triboelectric nanogenerators; Atomic Force Microscopy; Surface roughness; Polymers; Green energy.

INTRODUCCIÓN

Los nanogeneradores triboeléctricos (TENG) se han consolidado como una alternativa emergente para la generación de energía verde a partir de movimientos mecánicos de baja frecuencia, tales como vibraciones, presión o fricción superficial. Su principio de funcionamiento se basa en la electrificación por contacto y separación entre materiales con distinta afinidad electrónica, siendo su desempeño altamente dependiente tanto de la naturaleza química como de las propiedades físicas de las superficies involucradas.

Selección de materiales

Se analizaron tres materiales poliméricos con potencial aplicación en nanogeneradores triboeléctricos (TEGns):

- Politetrafluoroetileno (PTFE)
- Silicona
- Polipropileno (PP)

La selección se realizó considerando su posición en la serie triboeléctrica y su uso frecuente en dispositivos de recolección de energía mecánica.

Preparación de muestras

Las muestras fueron sometidas a limpieza básica para eliminar contaminantes superficiales y posteriormente fijadas sobre el portamuestras del equipo de Microscopía de Fuerza Atómica.

Condiciones de operación del AFM

La caracterización topográfica se realizó mediante una microscopía de fuerza atómica (AFM) marca Bruker en modo tapping (modo intermitente), utilizando:

- Punta modelo RTESPA-300 (MPP-11120)
- Cantilever de silicio
- Radio nominal de punta < 10 nm
- Frecuencia de resonancia aproximada ~300 kHz
- Constante de fuerza aproximada ~40 N/m

Para cada material se realizaron escaneos en áreas de:

- 10 μm \times 10 μm
- Resolución de imagen: 512 \times 512 píxeles
- Velocidad de escaneo: 0.5 Hz

Se obtuvieron mapas topográficos tridimensionales de cada superficie.

A partir de las imágenes topográficas se calcularon:

- Rugosidad promedio aritmética (R_a)
- Rugosidad cuadrática media (R_q)

Ambos parámetros fueron expresados en nanómetros (nm) y determinados mediante el software de análisis del equipo.

Análisis de datos

El análisis de los resultados se realizó de manera descriptiva y comparativa, evaluando las diferencias en topografía superficial entre los polímeros y su posible relación con el comportamiento triboeléctrico esperado de acuerdo a la literatura.

Debido al carácter exploratorio del estudio y al número limitado de muestras analizadas, no se aplicaron pruebas estadísticas inferenciales, enfocándose el análisis en la interpretación comparativa de los parámetros de rugosidad.

RESULTADOS

La caracterización topográfica mediante AFM permitió identificar diferencias estructurales significativas entre las superficies poliméricas analizadas. La Figura 2 muestra que el PTFE presenta una morfología con picos alineados y mesetas elongadas, lo que sugiere

una distribución anisotrópica de alturas superficiales. Este tipo de topografía puede incrementar el número de microcontactos efectivos durante la fricción, favoreciendo la acumulación y redistribución de carga en la interfaz como menciona Xiao et al. en su revisión [8].

En contraste, la Figura 3 revela que la silicona exhibe una superficie con baja amplitud topográfica y distribución homogénea de alturas, lo que indica una menor dispersión de asperezas activas. Desde el punto de vista tribológico, una superficie más lisa reduce la variabilidad del contacto, pero también puede disminuir la densidad de sitios activos para electrificación.

La Figura 4 muestra que el polipropileno presenta picos aislados y morfología irregular, lo que podría inducir concentración localizada de esfuerzos mecánicos y generación puntual de carga, aunque con menor uniformidad espacial [2].

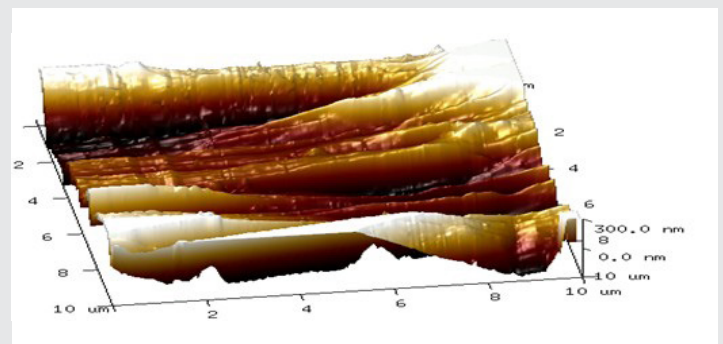


Figura 2. Topografía de una muestra de PTFE.

Fuente: Elaboración propia.

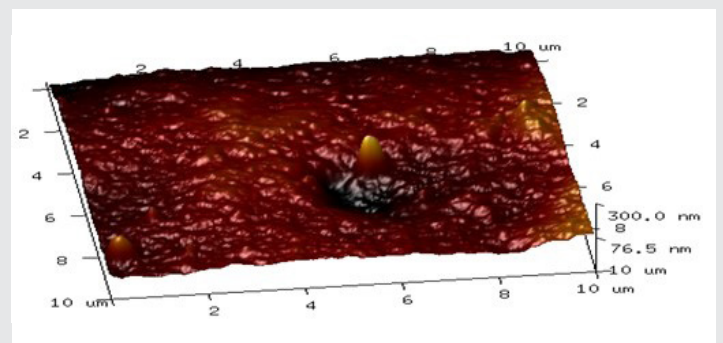


Figura 3. Topografía de una muestra de silicona.

Fuente: Elaboración propia.

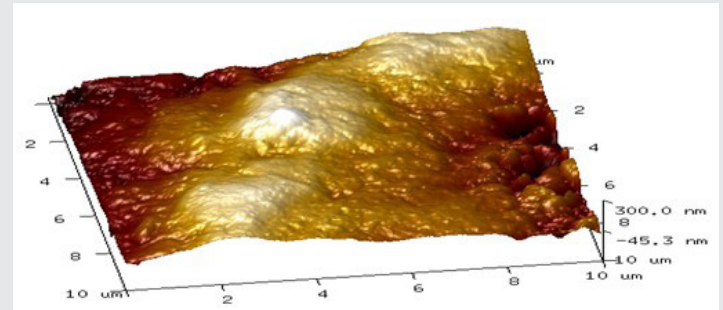


Figura 4. Topografía de una muestra de polipropileno.

Fuente: Elaboración propia.

El análisis cuantitativo confirmó estas observaciones. El PTFE registró los valores más altos de rugosidad ($R_a = 131$ nm, $R_q = 164$ nm), seguido del PP ($R_a = 84.1$ nm, $R_q = 105$ nm). En contraste, la silicona presentó los valores más bajos ($R_a = 27.4$ nm, $R_q = 34.3$ nm), indicando una superficie más homogénea como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de rugosidad.

Rugosidad R_a y R_q de los polímeros.		
Material	R_a (nm)	R_q (nm)
PTFE	131	164
Silicona	27.4	34.3
PP	84.1	105

Fuente: Elaboración propia.

El valor elevado de R_q en PTFE indica una mayor dispersión de alturas, lo que sugiere presencia de picos prominentes que incrementan el área de contacto bajo deformación mecánica. De acuerdo a modelos de contacto superficial (teoría de Greenwood-Williamson), un aumento en la rugosidad puede incrementar la fracción real de contacto respecto al área aparente, lo cual impacta directamente en la transferencia de electrones durante la electrificación por fricción [9].

Estudios han demostrado que la densidad de carga superficial (σ) puede correlacionarse con el área de contacto, la cual depende de la topografía nanométrica [10]. En este sentido, la mayor rugosidad del PTFE podría favorecer un incremento en la generación de carga triboeléctrica, particularmente considerando su posición negativa en la serie triboeléctrica.

Por otro lado, la silicona, al presentar valores bajos de R_a y R_q , ofrece un contacto más uniforme y mecánicamente estable, lo cual puede ser ventajoso en aplicaciones flexibles donde la repetibilidad del ciclo contacto-separación es prioritaria sobre la máxima de carga generada.

El PP mostró un comportamiento intermedio, donde la presencia de asperezas irregulares podría generar puntos de alta concentración de carga, pero con menor eficiencia global debido a la heterogeneidad del contacto.

Desde una perspectiva topográfica, la generación de carga en TENGs depende de:

1. Afinidad electrónica relativa (serie triboeléctrica).
2. Área de contacto.
3. Capacidad de retención superficial de carga.

El presente análisis sugiere que la rugosidad superficial medida mediante AFM puede actuar como parámetro complementario a la serie triboeléctrica para predecir el desempeño potencial del material.

Si bien los resultados corresponden a escaneos representativos, la tendencia observada establece una jerarquía topográfica clara: PTFE > PP > Silicona lo cual coincide con lo reportado en literatura respecto a la influencia de la morfología superficial en la densidad de carga interfacial.

CONCLUSIONES

La caracterización mediante Microscopía de Fuerza Atómica evidenció diferencias claras en la rugosidad superficial de los polímeros analizados, confirmando que este parámetro influye en el potencial triboeléctrico del material. El PTFE destacó por combinar alta rugosidad y afinidad electrónica favorable, posicionándose como el candidato con mayor potencial para aplicaciones en TENG. La silicona mostró ventajas en estabilidad de contacto para sistemas flexibles, mientras que el PP presentó un comportamiento intermedio.

El principal aporte del estudio radica en demostrar que el análisis cuantitativo de rugosidad mediante AFM complementa la serie triboeléctrica como criterio de selección de materiales, proponiendo una estrategia metodológica que fortalece el diseño racional de nanogeneradores triboeléctricos orientados a la generación de energía sustentable.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al CNMN-IPN, MICRONA-UV, TECNM Campus Misantla y a la SECIHTI por el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Q. Chen et al., "Quantifying triboelectric series of polymers based on the measurement of triboelectrification with NaCl solution," *Chemical Engineering Journal*, vol. 488, p. 150871, May 2024, doi: 10.1016/j.cej.2024.150871.
- [2] L.-X. Wu et al., "Interfacial Charge Transfer Mechanism and Output Characteristics of Identical-Material Triboelectric Nanogenerators," *Nanomaterials*, vol. 15, no. 10, p. 708, May 2025, doi: 10.3390/nano15100708.
- [3] T. P. Rahul and P. S. R. Sreekanth, "Synergies in Materials and Manufacturing: A Review of Composites and 3D Printing for Triboelectric Energy Harvesting," *Journal of Composites Science*, vol. 9, no. 8, p. 386, Jul. 2025, doi: 10.3390/jcs9080386.
- [4] Y. Kim et al., "Atomic Force Microscopy for Ferroelectric Materials Research," *J. Mater. Chem. C Mater.*, 2026, doi: 10.1039/D5TC03998C.

[5] S. Dinarelli, A. Sikora, A. Sorbo, M. Rossi, and D. Passeri, "Atomic force microscopy as a tool for mechanical characterization at the nanometer scale," *Nanomaterials and Energy*, vol. 12, no. 2, pp. 71–80, Jul. 2023, doi: 10.1680/jnaen.23.00016.

[6] N. Wang and X. Zhao, "Atomic Force Microscopy – A Powerful Tool for Studying Contact Electrification," *Adv. Mater. Technol.*, vol. 8, no. 6, Mar. 2023, doi: 10.1002/admt.202201408.

[7] Y. Li et al., "Roughness-driven compressive sensing AFM for accurate nanoscale surface characterization in functional material systems," *Mater. Des.*, vol. 256, p. 114351, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.matdes.2025.114351.

[8] K. Xiao, W. Wang, K. Wang, H. Zhang, S. Dong, and J. Li, "Improving Triboelectric Nanogenerators Performance Via Interface Tribological Optimization: A Review," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 34, no. 39, Sep. 2024, doi: 10.1002/adfm.202404744.

[9] J. Wen, H. He, C. Niu, M. Rong, Y. Huang, and Y. Wu, "An improved equivalent capacitance model of the triboelectric nanogenerator incorporating its surface roughness," *Nano Energy*, vol. 96, p. 107070, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.nanoen.2022.107070.

[10] P. I. Brăileanu and N. E. Pascu, "Influence of Surface Texture in Additively Manufactured Biocompatible Materials and Triboelectric Behavior," *Materials*, vol. 18, no. 14, p. 3366, Jul. 2025, doi: 10.3390/ma18143366.

