

Materiales que Almacenan y Liberan Electricidad de Manera Sorprendentemente Rápida

Yaneli Reséndiz-Trejo, Félix Sánchez-De Jesús, María Isabel Reyes-Valderrama, y Ana María Bolarín-Miró *

Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca, Hidalgo, México

* Autor de correspondencia: abolaron@uaeh.edu.mx; Tel.: +527717172000 Ext. 40146

Artículo de divulgación científica

Recibido: 15 de abril de 2026

Aceptado: 14 de julio de 2026

Publicado: 24 de julio de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i2.717>

Resumen: Los materiales ferroeléctricos relaxores constituyen una familia de cerámicos avanzados capaces de almacenar y liberar energía de manera altamente eficiente, una propiedad clave para el desarrollo de dispositivos electrónicos modernos. Su comportamiento se debe a la presencia de pequeñas regiones internas conocidas como regiones polares nanométricas (PNRs), las cuales responden de una manera dinámica al campo eléctrico externo aplicado. A lo largo del texto se explican los principios que rigen su funcionamiento, las estrategias utilizadas para mejorar sus propiedades y sus principales aplicaciones en capacitores, sistemas de almacenamiento de energía y sensores de alta precisión. Finalmente, se presentan los retos que aun enfrenta su implementación tecnológica.

Palabras clave: ferroeléctrico relaxor, cerámicos avanzados, almacenamiento de energía, capacitor, densidad de energía

Introducción

En la actualidad, gran parte de la tecnología que se emplea diariamente depende de la capacidad de almacenar y liberar energía eléctrica de forma rápida y eficiente. Dispositivos como teléfonos móviles, computadoras, equipos médicos y sistemas basados en energías renovables requieren materiales capaces de responder con gran rapidez a estímulos eléctricos, lo que impacta directamente en su desempeño, eficiencia y durabilidad. En este contexto, el desarrollo de nuevos materiales para almacenamiento energético se ha convertido en una de las áreas más activas dentro de la ciencia de materiales y la electrónica moderna, particularmente en el diseño de sistemas que permitan alta densidad de energía eléctrica y tiempos de respuesta ultrarrápidos (Li *et al.*, 2024; Zhu *et al.*, 2023; Xu *et al.*, 2025).

Entre las alternativas más prometedoras dentro de los diferentes tipos de materiales, destacan los cerámicos avanzados y en particular aquellos que presentan un comportamiento ferroeléctrico relaxor, caracterizados por poseer la capacidad de almacenar energía eléctrica y liberarla en escalas de tiempo extremadamente cortas. Estos materiales son fundamentales en dispositivos como capacitores de potencia, sistemas electrónicos de alta velocidad y tecnologías de pulso, donde se requiere una liberación rápida de energía. Estudios recientes han demostrado que estos sistemas pueden alcanzar densidades de energía superiores a $10 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-3}$, con eficiencias cercanas o superiores al 80 %, posicionándolos como candidatos clave para aplicaciones tecnológicas emergentes (Peng *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2023; X. Zhu *et al.*, 2024).

Una de las características que hace especiales a estos materiales es que, en su interior, existen pequeñas zonas donde las cargas eléctricas se orientan en una misma dirección. Estas pequeñas regiones pueden cambiar su orientación cuando se aplica un campo eléctrico externo, permitiendo almacenar y liberar energía de manera eficiente. Estas zonas reciben el nombre de regiones polares nanométricas (PNRs, por sus siglas en inglés). Estas regiones son las que favorecen el comportamiento tipo ferroeléctrico relaxor, el cual se asocia a que la polarización se organiza en regiones pequeñas y desordenadas, lo que favorece una respuesta más eficiente al campo eléctrico, con menores pérdidas de energía y mejores propiedades para almacenamiento. (Li *et al.*, 2024; C. Zhu *et al.*, 2022). Además, investigaciones recientes han demostrado que el control de estas regiones, junto con la ingeniería de defectos y la ingeniería composicional, permite optimizar significativamente las propiedades eléctricas del material, incrementando tanto su densidad de energía como su estabilidad térmica (Bilal *et al.*, 2024).

En los últimos años, la investigación en estos sistemas se ha centrado en estrategias como el diseño de materiales libres de plomo, la ingeniería de microestructura y el uso de enfoques de ingeniería composicional o alta entropía, los cuales han demostrado ser altamente efectivos para mejorar el rendimiento energético. Estas aproximaciones permiten modificar la distribución de cargas, reducir pérdidas de energía y aumentar la estabilidad del material bajo condiciones de operación exigentes. Como resultado, se han desarrollado sistemas capaces de alcanzar densidades de energía

superiores a $15 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-3}$ en dispositivos multicapa y eficiencias cercanas al 90 %, lo que representa un avance significativo hacia la implementación de tecnologías más compactas, eficientes y sostenibles (Y. Zhang *et al.*, 2025).

En este contexto, comprender los principios físicos que gobiernan el comportamiento de estos materiales resulta fundamental para impulsar el desarrollo de nuevas tecnologías energéticas. Por ello, a continuación, se presentan de manera accesible los fundamentos que explican su respuesta eléctrica, se revisan los avances recientes en su diseño y se discuten sus principales aplicaciones en dispositivos electrónicos y sistemas modernos de almacenamiento de energía.

Desarrollo

Materiales ferroeléctricos y sus características

Los materiales ferroeléctricos poseen una propiedad específica llamada polarización eléctrica espontánea. En términos sencillos, significa que en su interior existen pequeñas cargas eléctricas positivas y negativas orientadas de manera natural de manera natural sin necesidad de aplicar un campo eléctrico, esta orientación puede invertirse al aplicar un campo externo alternante. Este comportamiento se atribuye a su estructura no centrosimétrica, es decir la distribución de los átomos dentro del material no es completamente simétrica. Como consecuencia, se generan pequeños dipolos eléctricos que se agrupan y forman dominios ferroeléctricos, regiones donde millones de dipolos apuntan a una misma dirección.

En la Figura 1 se muestra la organización de los dominios en distintos tipos de materiales. Los ferroeléctricos clásicos presentan dominios grandes y bien ordenados. En cambio, los materiales ferroeléctricos relaxores exhiben regiones polares nanométricas desordenadas, lo que les confiere una respuesta dependiente de la frecuencia y, en general, mayor eficiencia energética. Por su parte, los materiales paraeléctricos no presentan polarización espontánea en ausencia de un campo eléctrico, aunque pueden polarizarse temporalmente al aplicarlo (Li *et al.*, 2024; Scott, 2000).

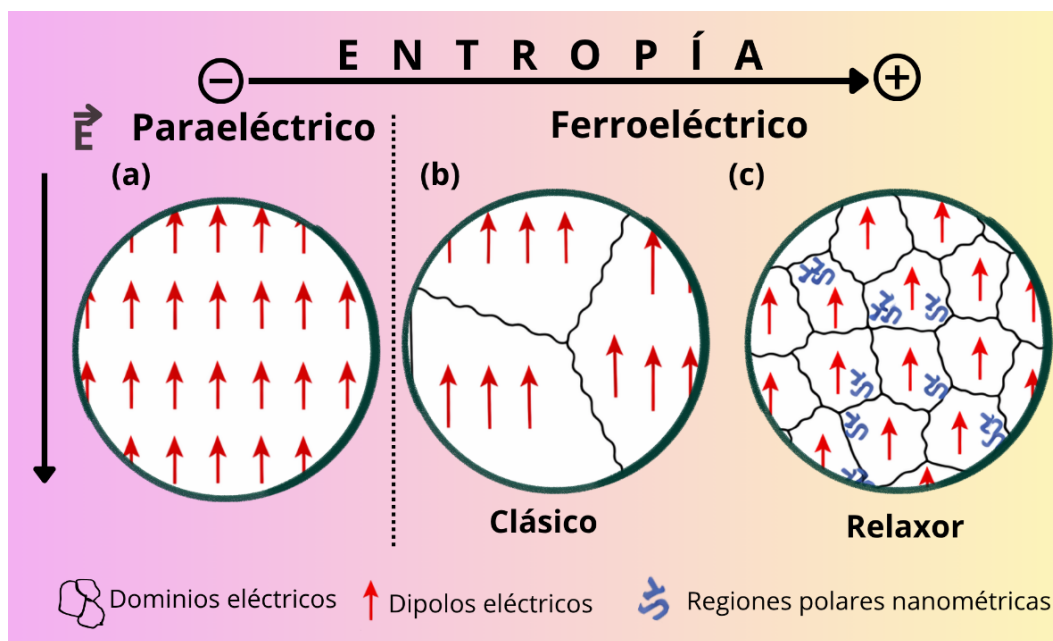


Figura 1. Representación esquemática de la organización de dominios presentados por materiales ferroeléctricos: (a) clásicos, (b) relaxores y (c) paraeléctricos.

El comportamiento relaxor en los materiales ferroeléctricos

Los materiales ferroeléctricos relaxores han despertado gran interés debido a que combinan alta densidad de energía con bajas pérdidas energéticas, una característica importante para dispositivos electrónicos modernos. Su comportamiento está relacionado con las nanoregiones polares, las cuales responden de manera gradual y no uniforme

cuando se aplica un campo eléctrico. Una forma de comprender este fenómeno es a través de curvas de polarización o histéresis eléctrica. Estas curvas muestran la respuesta de la polarización de los dominios ante la aplicación de un campo eléctrico. En los materiales ferroeléctricos clásicos, las curvas son más anchas, indicando menor eficiencia energética. En contraste, los materiales ferroeléctricos relaxores exhiben ciclos de histéresis más delgados, lo que representa una mayor proporción de energía almacenada y una alta eficiencia. Por su parte, los materiales paraeléctricos muestran una relación lineal entre el campo eléctrico y la polarización, lo que evidencia la ausencia de polarización espontánea en ausencia de campo externo.

Esto se representa en la Figura 2, el análisis de estos comportamientos permite calcular parámetros fundamentales como la energía recuperable (W_{rec}), las pérdidas de energía (W_{loss}) y la eficiencia de recuperación (η), estos parámetros son esenciales para evaluar el desempeño en aplicaciones de almacenamiento de energía.

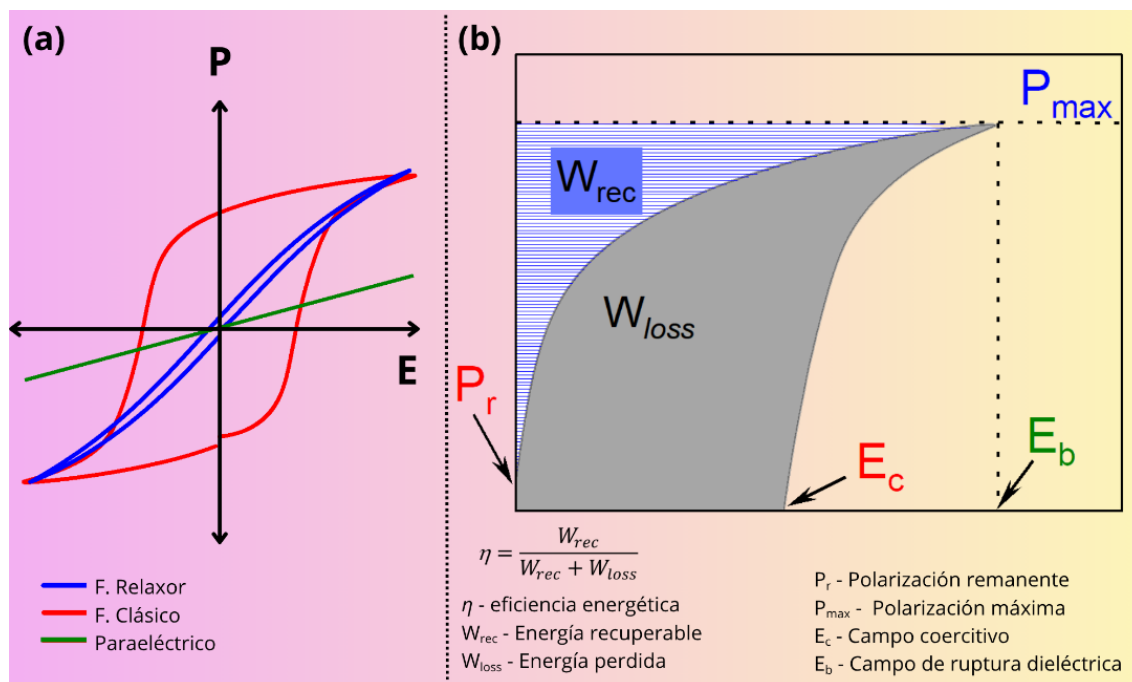


Figura 2. (a) Curvas de polarización eléctrica para diferentes comportamientos ferroeléctricos y (b) representación esquemática de la determinación de la energía almacenada (W_{rec}), pérdida (W_{loss}) y eficiencia energética (η) a partir del ciclo de histéresis.

El comportamiento de los materiales ferroeléctricos se puede modificar mediante diferencias estrategias de diseño. Factores como el tamaño de grano, la microestructura, la distribución de defectos cristalinos y la formación de regiones polares nanométricas juegan un papel importante en la cantidad de energía que pueda ser recuperada y almacenada en este tipo de materiales (Bilal *et al.*, 2024).

Es entonces que la ingeniería composicional ha emergido como una herramienta clave para el desarrollo de nuevos materiales con propiedades mejoradas. En particular, los enfoques basados en materiales de alta entropía han permitido explorar combinaciones complejas de elementos que favorecen la estabilidad estructural y el comportamiento relaxor. Estos sistemas han demostrado alcanzar valores excepcionales de densidad de energía y eficiencia, superando en algunos casos los límites de los materiales tradicionales. En conjunto, estos avances evidencian el enorme potencial de los materiales ferroeléctricos como plataformas versátiles para aplicaciones en almacenamiento de energía y electrónica moderna.

Aplicaciones

Debido a sus propiedades eléctricas, los materiales ferroeléctricos clásicos y los relaxores presentan un amplio potencial en diversas aplicaciones tecnológicas, algunas de las cuales se muestran en la Figura 3. Una de las más relevantes es su uso en capacitores de alta densidad de energía, dispositivos fundamentales en los sistemas

electrónicos modernos. Gracias a su capacidad para almacenar grandes cantidades de energía y liberarla en tiempos muy cortos, resultan esenciales en convertidores de potencia, sistemas de pulso y dispositivos electrónicos de alta velocidad (Z. Li *et al.*, 2022; C. Zhu *et al.*, 2022). Asimismo, estos materiales desempeñan un papel importante en sistemas de almacenamiento de energía asociados a fuentes renovables, como la energía solar y eólica, ya que permiten almacenar temporalmente la energía generada y suministrarla de manera rápida cuando el sistema lo requiere, mejorando así la eficiencia (Y. Li *et al.*, 2024; W. Zhu *et al.*, 2023). Su implementación también es clave en dispositivos electrónicos miniaturizados, en los que el tamaño reducido y la eficiencia energética son determinantes, como en teléfonos móviles, sensores, actuadores, equipos médicos e incluso sistemas de carga rápida (A. Zhang *et al.*, 2023). En el ámbito industrial, destacan en aplicaciones que requieren descargas rápidas de energía, como generadores de pulsos eléctricos, radares y tecnologías de defensa, donde su capacidad de liberar energía de forma casi instantánea resulta especialmente valiosa (Y. Li *et al.*, 2024). Finalmente, el desarrollo de estos materiales impulsa la aparición de tecnologías emergentes, como dispositivos inteligentes y sistemas electrónicos más sostenibles, algunos han sido reportados en estudios recientes sobre materiales avanzados para almacenamiento energético (Reséndiz-Trejo *et al.*, 2025). Particularmente cuando se emplean composiciones libres de plomo, estos materiales podrían contribuir al desarrollo de tecnologías más sostenibles; sin embargo, aún existen retos relacionados con su estabilidad, escalamiento industrial y costo de fabricación.

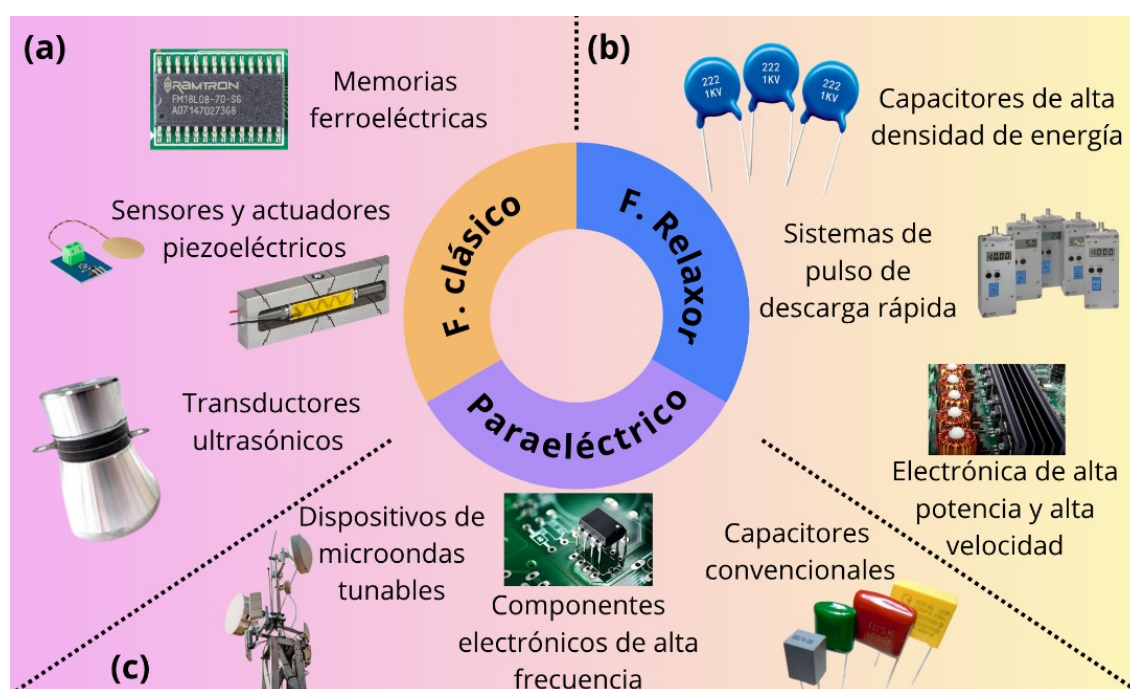


Figura 3. Principales aplicaciones de los materiales ferroeléctricos: (a) clásicos, (b) relaxores y (c) paraeléctricos en tecnologías energéticas y electrónicas.

Conclusiones

Los materiales ferroeléctricos, y en particular los de tipo relaxor, representan una de las alternativas más prometedoras para el desarrollo de dispositivos de almacenamiento de energía, ya que su capacidad para almacenar y liberar energía eléctrica de manera eficiente, junto con sus propiedades estructurales únicas, los convierten en una alternativa muy atractiva para el desarrollo de tecnologías más eficientes, rápidas, compactas y sostenibles. A lo largo de este trabajo se explicó que su comportamiento está estrechamente relacionado con su estructura interna, especialmente con la presencia de regiones polares nanométricas, las cuales favorecen una respuesta dinámica ante los campos eléctricos. Además, propiedades como la alta densidad de energía, la eficiencia de recuperación y la forma del ciclo de histéresis permiten evaluar su desempeño y comprender por qué estos materiales son atractivos para aplicaciones que requieren una respuesta rápida y eficiente. En este sentido, los avances recientes en la ingeniería composicional y el control de la microestructura han permitido mejorar significativamente estas propiedades, acercándolos cada vez más a su implementación en dispositivos electrónicos y sistemas de almacenamiento energético. Sin embargo, aún existen retos relacionados con la estabilidad, el escalamiento de los procesos de fabricación y la optimización de costos, aspectos

que deberán resolverse para favorecer su implementación a gran escala. De cara al futuro, se espera que la investigación en estos materiales continúe evolucionando e impulsando el desarrollo de nuevas tecnologías que contribuyan a una transición hacia sistemas energéticos más eficientes y sostenibles.

Agradecimientos y financiamiento: Yaneli Reséndiz Trejo agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada para la realización de sus estudios de doctorado. Asimismo, los autores agradecen el apoyo financiero de la SECIHTI a través del proyecto CF-2023-I-769.

Bibliografía

- Bilal, M. K., Bashir, R., Asif, S. U., & Jiyang, X. (2024). Enhanced energy storage density and ultrahigh efficiency achieved in BNT-BST-NN relaxor ferroelectric through the introduction of nanodomains and grain size engineering. *Journal of Energy Storage*, 97, 112841. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112841>
- Li, Y., Lu, G., Zhao, Y., Zhao, R., Zhao, J., Hao, J., Bai, W., Li, P., & Li, W. (2024). Ferroelectric and relaxor-ferroelectric phases coexisting boosts energy storage performance in $(\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5})\text{TiO}_3$ -based ceramics. *Molecules*, 29(13), 3187. <https://doi.org/10.3390/molecules29133187>
- Li, Z., Li, D.-X., Shen, Z.-Y., Zeng, X., Song, F., Luo, W., Wang, X., Wang, Z., & Li, Y. (2022). Remarkably enhanced dielectric stability and energy storage properties in BNT-BST relaxor ceramics by A-site defect engineering for pulsed power applications. *Journal of Advanced Ceramics*, 11(2), 283–294. <https://doi.org/10.1007/s40145-021-0532-8>
- Peng, H., Wu, T., Liu, Z., Fu, Z., Wang, D., Hao, Y., Xu, F., Wang, G., & Chu, J. (2024). High-entropy relaxor ferroelectric ceramics for ultrahigh energy storage. *Nature Communications*, 15(1), 5232. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-49107-1>
- Reséndiz-Trejo, Y., Sánchez-De Jesús, F., Cortés-Escobedo, C. A., Betancourt-Cantera, L. G., Herrasti-González, P., & Bolarín-Miró, A. M. (2025). Facile synthesis of high-entropy lead-free relaxor ferroelectric ceramics via high-energy ball milling. *Materialia*, 43, 102513. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2025.102513>
- Scott, J. F. (2000). *Ferroelectric memories*. Springer.
- Xu, L.-Y., Ouyang, J., Cheng, Z.-X., & Huan, Y. (2025). A review on the dielectric ceramics for high energy-storage application. *Advanced Ceramics*, 46(3–4), 195–246. <https://doi.org/10.16253/j.cnki.37-1226/tq.2025.03.001>
- Zhang, A., Chu, R., Lu, G., Zhang, Y., Duan, L., Li, G., & Xu, Z. (2023). Electrical, luminescent properties and electronic structure of (Ho, Nb) co-doped BNT-based multifunctional ceramics. *Ceramics International*, 49(12), 20799–20807. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.03.212>
- Zhang, Y., Xie, A., Tian, A., Lei, J., Li, Z., Jiang, X., Xie, X., Gao, X., Er, X., Liu, L., Li, T., Rahman, A., & Zuo, R. (2025). Superior multilayer ceramic energy-storage capacitors using NaNbO_3 -based relaxor ferroelectrics with heterogeneous nanodomains. *Chemical Engineering Journal*, 507, 160821. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.160821>
- Zhu, C., Ye, W., Zheng, P., Zhang, H., Lu, F., Fan, Q., Zhang, J., Zheng, L., Zhang, Y., & Bai, W. (2022). Fantastic energy storage performances and excellent stability in BiFeO_3 - SrTiO_3 -based relaxor ferroelectric ceramics. *ACS Applied Energy Materials*, 5(7), 8492–8500. <https://doi.org/10.1021/acsaem.2c01029>
- Zhu, W., Shen, Z.-Y., Deng, W., Li, K., Luo, W., Song, F., Zeng, X., Wang, Z., & Li, Y. (2023). A review: $(\text{Bi},\text{Na})\text{TiO}_3$ (BNT)-based energy storage ceramics. *Journal of Materiomics*. <https://doi.org/10.1016/j.jmat.2023.05.002>
- Zhu, X., Liu, W., Zhu, G., Xiong, S., Chen, D., Lei, X., Liu, L., & Li, C. (2024). Entropy-engineered BaTiO_3 -based perovskite ceramics via A/B site synergetic design to enhance energy storage properties. *Journal of Materials Chemistry C*, 12(47), 19086–19093. <https://doi.org/10.1039/d4tc03942d>