

Simulación de trayectorias de partículas en el Tokamak ITER

Alamo, RenzoPontificia Universidad
Católica del Perú
renzo.alamo@pucp.edu.pe**Apoyala, Iván**Universidad Nacional
Mayor de San Marcos
ivan.apolaya@unmsm.edu.pe**Chávez, S. Matheus**Pontificia Universidad
Católica del Perú
a20230590@pucp.edu.pe**Edery W., Andy J.**Pontificia Universidad
Católica del Perú
a20212445@pucp.edu.pe

Abstract

Comprender la dinámica de partículas y evaluar los procesos de transporte y estabilidad es esencial para el desarrollo de reactores de fusión por confinamiento magnético, como busca ITER. Ello exige el uso de simulaciones numéricas capaces de analizar la dinámica electromagnética y estudiar fenómenos poco accesibles para la investigación experimental. El presente trabajo simula y analiza la trayectoria de 10 protones al interior del Tokamak de ITER bajo el campo magnético toroidal con el software COMSOL. En una primera etapa se modeló y resolvió la distribución espacial del campo magnético en los solenoides de ITER con forma de D, excitados con 43,6 kA. Bajo esta configuración se simuló las trayectorias de las partículas dentro del reactor.

Motivación

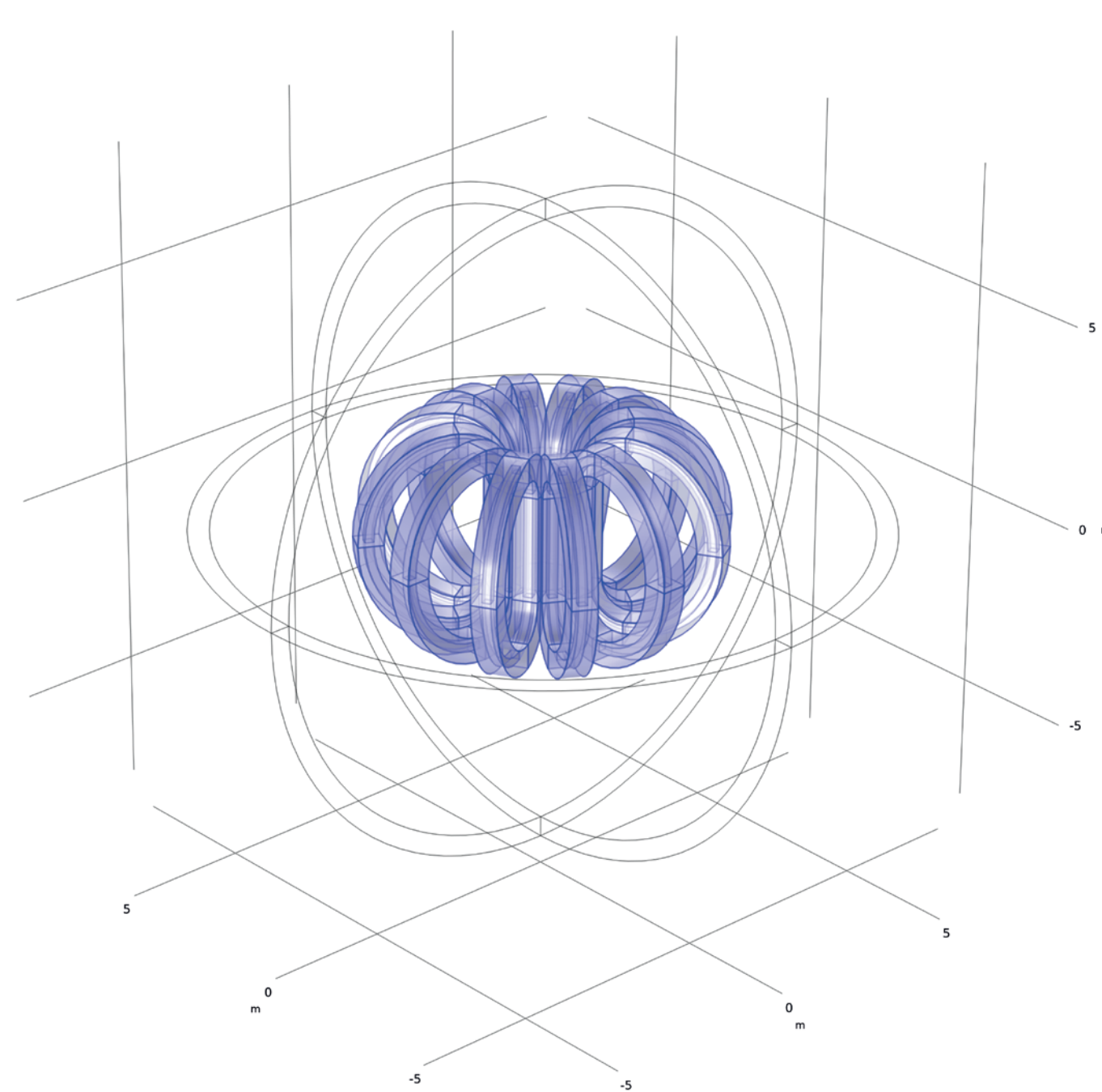
Una simulación tridimensional simplificada del campo magnético de ITER permite estudiar de manera inicial la dinámica del plasma. Reducir la complejidad del campo hace el problema tratable y útil para explorar fenómenos clave de la fusión y su enseñanza a nivel introductorio

Introducción

Los tokamaks son de las alternativas más prometedoras para la fusión nuclear controlada. Estos confinan los plasmas de deuterio-tritio (D-T) mediante una serie de campos magnéticos muy intensos (H-mode) [1]. Sin embargo, la complejidad de los fenómenos como la turbulencia hacen de la simulación numérica una herramienta indispensable [2].

Método

Para el desarrollo de la geometría en D se utilizó una unión dos piezas extruidas en COMSOL formando la estructura en D. Se simuló un paso de corriente dentro de esta estructura, generando los campos magnéticos deseados. Esta estructura se rotó para conformar 12 solenoides.



Solenoides simulados de cobre recubiertos con acero inoxidable 405 en condición recocida [3]

En el desarrollo de la dinámica de partículas se eligió al protón como base de la simulación. Se agregó módulos de la dinámica de la partícula bajo la presencia de fuerzas externas.

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (1)$$

La dinámica de la trayectoria es descrita por (1). Se considera solo la presencia de campo magnéticos bajo el módulo de Particle Tracing no relativista de COMSOL. En este modelo las partículas interactúan con el campo externo pero no entre los suyos.

Se eligió como posiciones iniciales un arreglo simétrico dentro del toro con radios entre [2,2.5] m. Éstos con una leve inclinación del plano de posición de las partículas. Se designaron 6 nodos radiales, 3 angulares, y 2 partículas por cada nodo, formando en total 36 partículas. Las velocidades fueron designadas bajo una distribución Maxwelliana con temperatura de 290 000 K.

Finalmente se implementó un estudio multidisco donde se calculan los flujos magnéticos totales. En este se calcularon las trayectorias de las partículas en un rango de tiempo de $5 \cdot 10^{-4}$ s.

Resultados

Campo magnético B

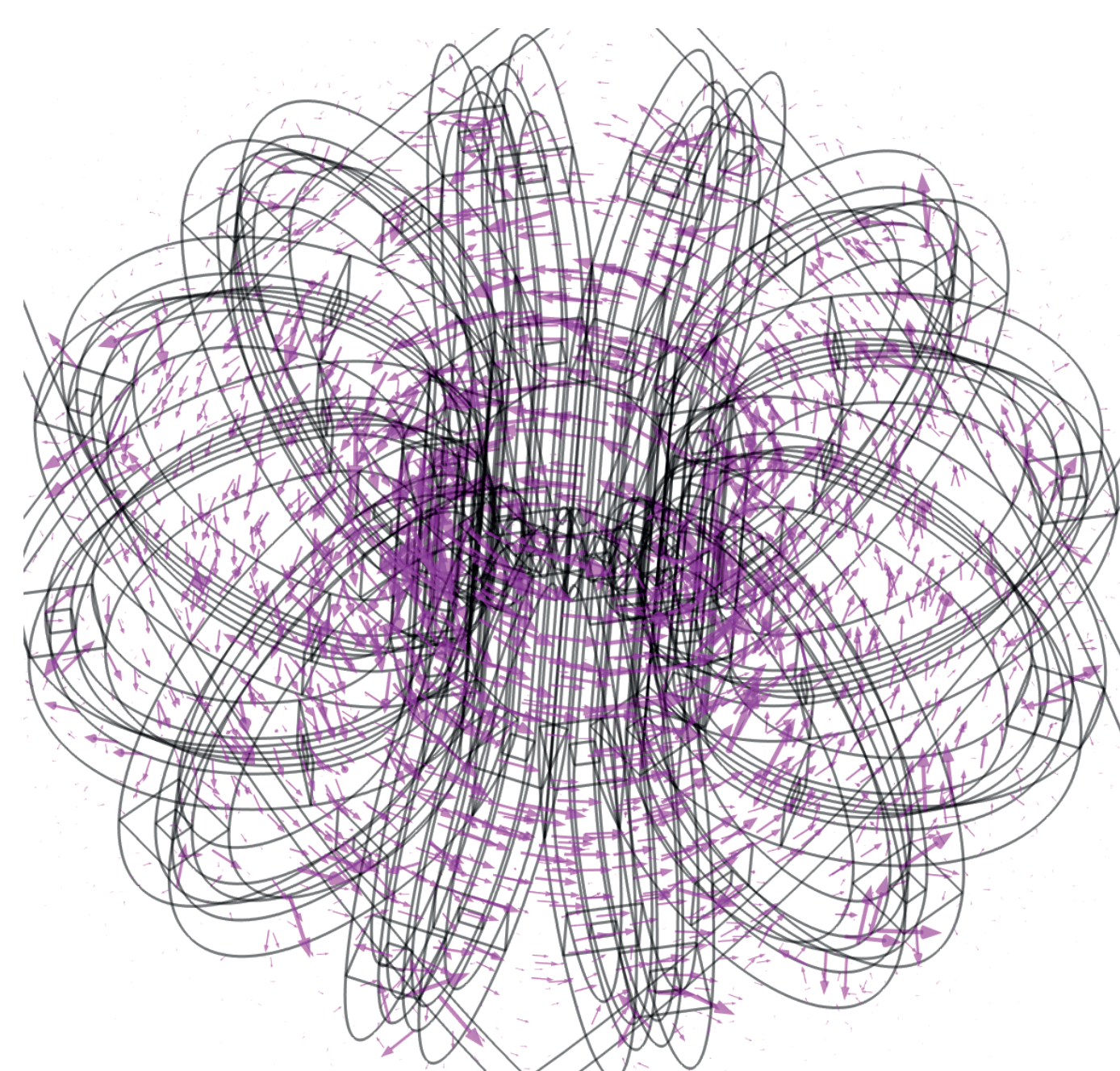
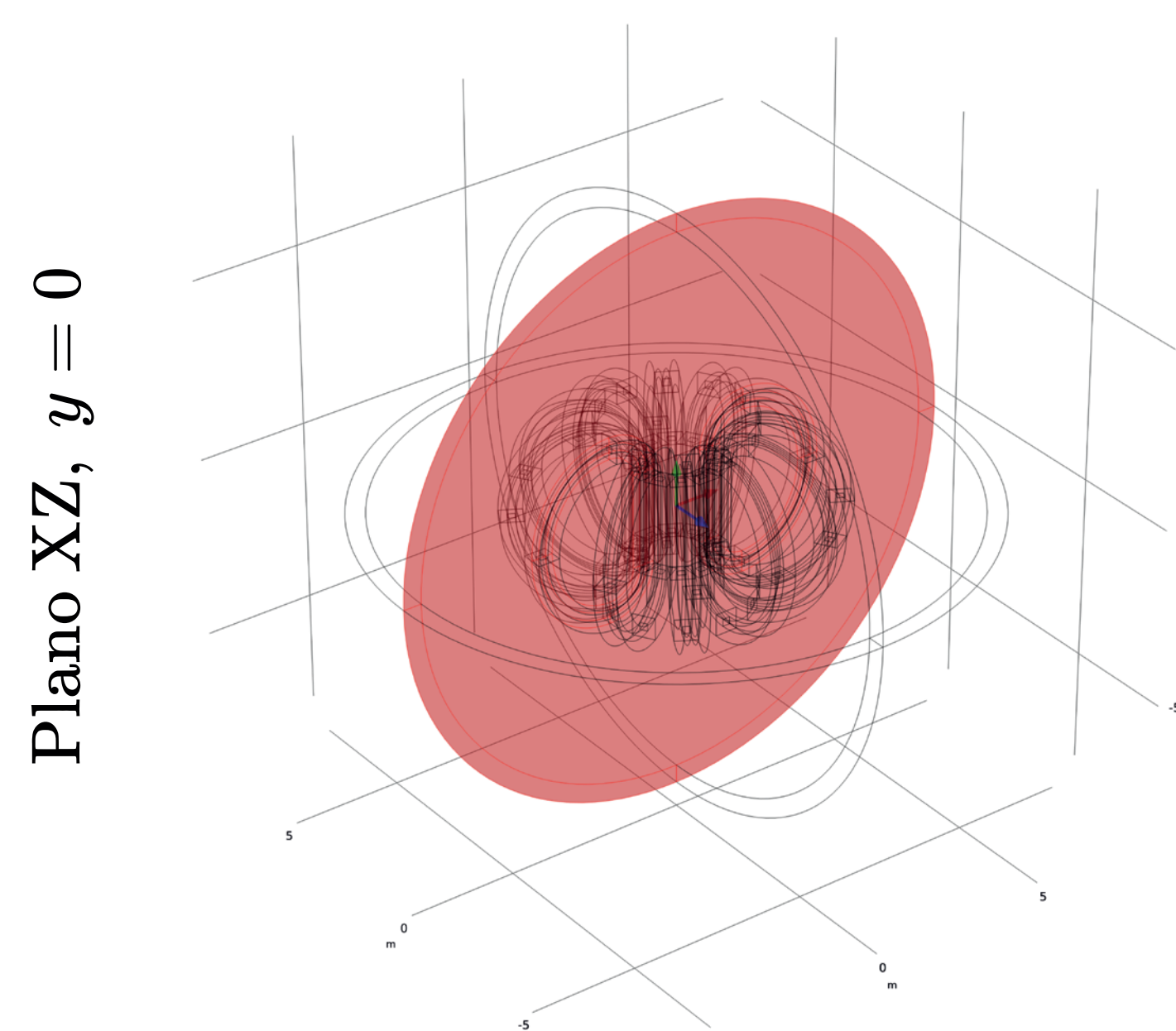
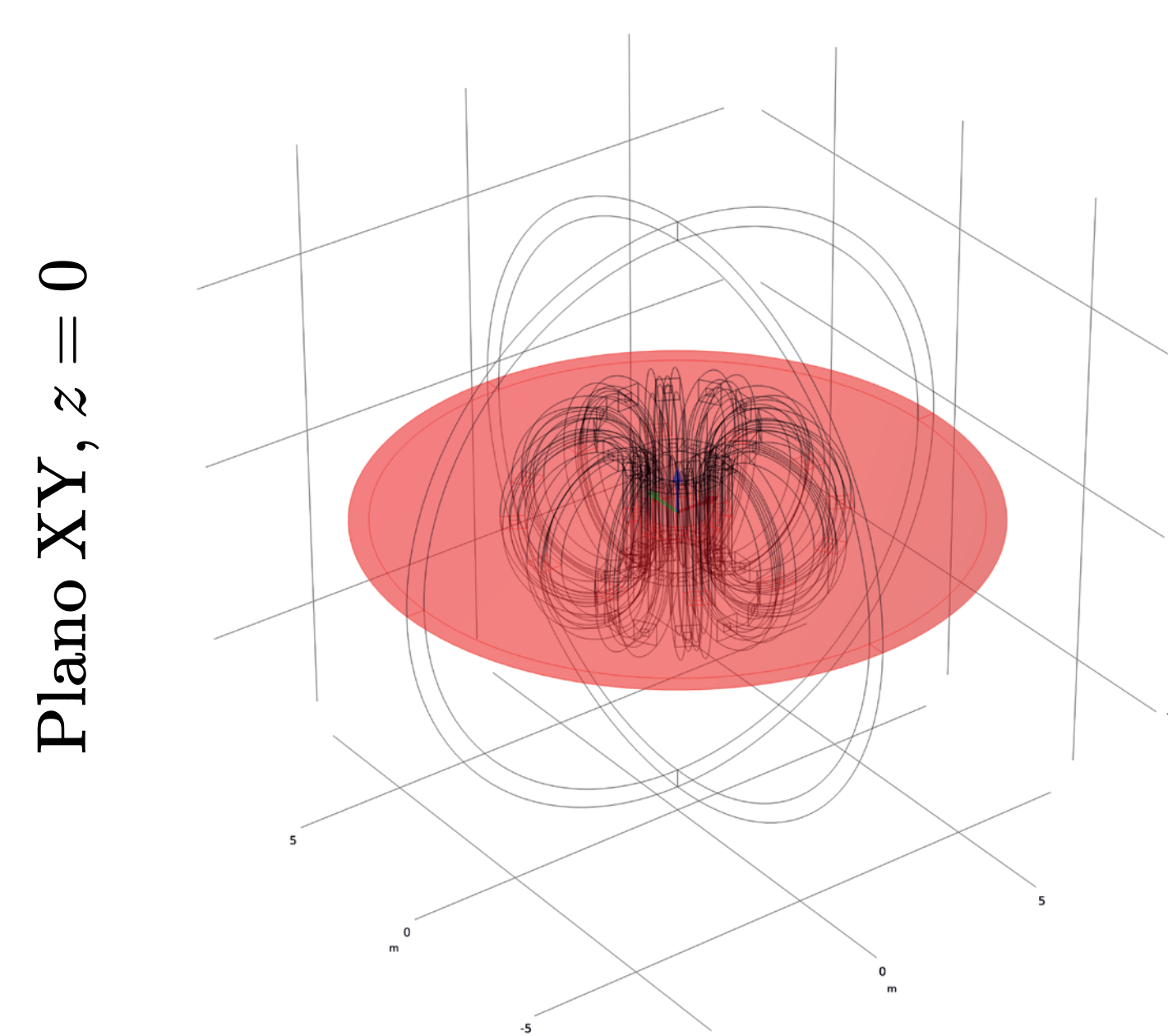
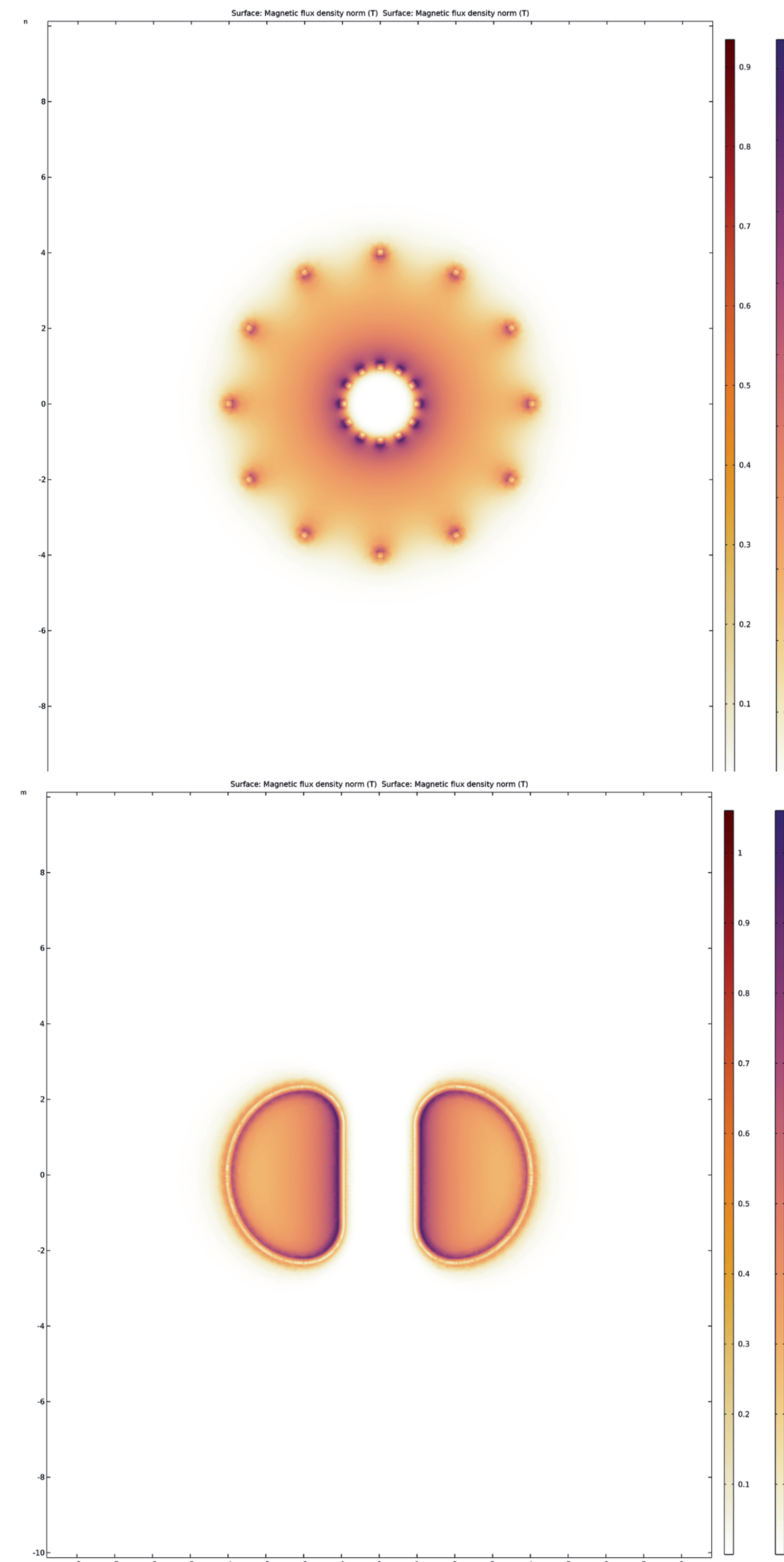


Gráfico 3D de las líneas de campo magnético.

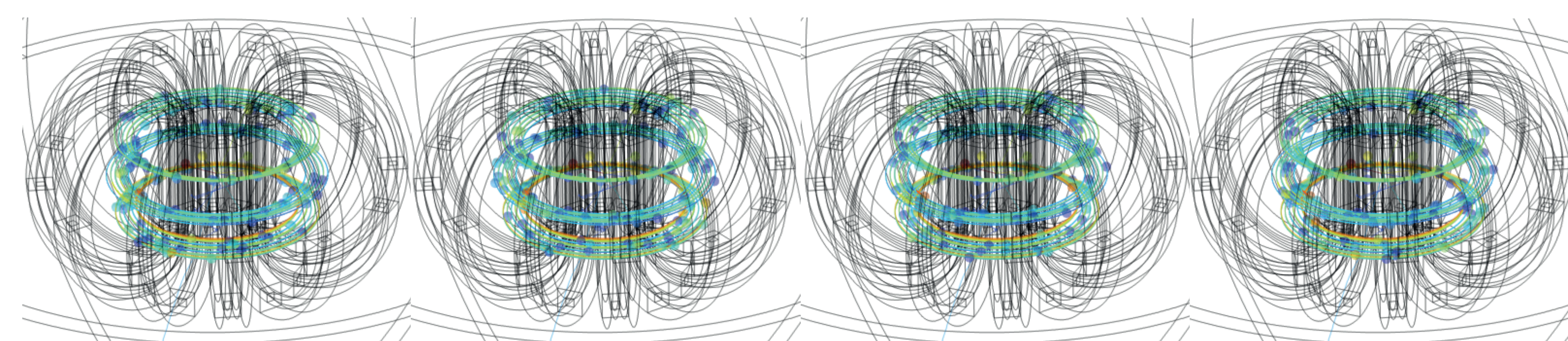
Corte transversal en el Tokamak



Densidad del flujo magnético ||B||



Trayectorias de las partículas



Análisis

Los cortes transversales confirman un campo toroidal bien definido, mientras que los mapas de $||\mathbf{B}||$ presentan modulaciones angulares asociadas al número de bobinas toroidales, lo que indica un modelado realista del sistema de coils. Esta configuración es capaz de confinar partículas cargadas en trayectorias helicoidales cerradas, cuya estabilidad y simetría reflejan un buen balance del campo magnético. Los máximos del campo magnético se localizan en las regiones más cercanas a las bobinas toroidales y en el lado interno del toro, en acuerdo con la dependencia radial esperada del campo toroidal. Estas variaciones espaciales de $||\mathbf{B}||$ no comprometen el confinamiento, pero sí introducen modulaciones realistas que reproducen efectos inherentes a la discretización de las bobinas en ITER.

Conclusiones

Se logra simular el campo magnético debido a los solenoides D del tokamak ITER bajo parámetros reales. Las trayectorias de los 10 protones simulados son coherentes con el comportamiento esperado en un tokamak. Por lo que esta simulación se puede usar como base para observar el confinamiento de partículas en ITER e investigar cómo las condiciones iniciales de velocidad y posición afectan la estabilidad general del plasma. Para obtener una distribución de campo más realista se pueden añadir las bobinas coloidales, el solenoide central y la interacción entre campos de las partículas.

- [1] Vega, J., Murari, A., Dormido-Canto, S. et al. Disruption prediction with artificial intelligence techniques in tokamak plasmas. Nat. Phys. 18, 741–750 (2022).
- [2] Williams, Timothy J., et al. “Gyrokinetic Simulation for Realistic Tokamak Parameters.” Anl.gov, 2025
- [3] Cocilovo, V. Analysis of D-Shaped Toroidal Superconductive Coils for Medium Size Fusion Experiment Facility
- [4] Hoppe, Mathias, et al. Simulation of Charged Particle Orbits in Fusion Plasmas. Chalmers University of Technology, May 2015.