

Plan Maestro de Implementación para Simulaciones de Radioterapia de Alta Fidelidad en GATE 10 y Desarrollo de Modelos Sustitutos mediante Inteligencia Artificial

Arquitectura y Fundamentos de la Nueva Generación GATE 10

La evolución de la investigación en física médica computacional ha experimentado una transformación paradigmática con el lanzamiento de GATE 10, también conocido bajo el ecosistema de OpenGate. Esta iteración representa un distanciamiento fundamental de la arquitectura tradicional basada en macros que definió a las versiones anteriores, para adoptar un entorno de programación nativo en Python que facilita la interoperabilidad con bibliotecas de ciencia de datos y aprendizaje profundo.¹ El núcleo de este sistema se fundamenta en el kit de herramientas Geant4 11.3.2, permitiendo que la simulación de transporte de partículas se convierta en un componente más de un flujo de trabajo científico moderno, eliminando las barreras de scripting que anteriormente dificultaban la integración de modelos de Inteligencia Artificial (IA) en tiempo real.¹

El diseño de GATE 10 se basa en una clase base común denominada GateObject, la cual utiliza mecanismos de factoría de clases activados automáticamente al importar el módulo o instanciar objetos.³ Esta estructura no solo garantiza la coherencia interna del sistema, sino que permite la serialización de simulaciones completas en formatos legibles como JSON, lo que resulta crítico para la reproducibilidad y la distribución de tareas en clústeres de computación de alto rendimiento.³ Para los investigadores del Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías (CUCEI), este avance significa que el "Proyecto Modular 3" puede ahora integrar de forma nativa la generación de conjuntos de datos masivos para el entrenamiento de redes neuronales sin necesidad de recurrir a complejos procesos de conversión de archivos.³

Componente del Sistema	Especificación Técnica	Función en el Flujo de Trabajo
------------------------	------------------------	--------------------------------

Núcleo de Simulación	Geant4 11.3.2	Motor de física para el transporte de partículas. ¹
Interfaz de Usuario	Python 3.9 - 3.12	Definición de geometría, fuentes y análisis. ¹
Visualización	Qt, VRML, GDML	Representación gráfica de la simulación. ⁵
Gestión de Datos	ITK / NumPy	Procesamiento de imágenes y matrices de dosis. ³
Soporte de IA	ONNX / PMML	Despliegue de modelos de predicción de dosis. ⁷

Fase 1: Configuración del Entorno de Desarrollo y Despliegue Técnico

El establecimiento de un entorno robusto es el primer paso crítico para el éxito de una simulación de radioterapia. Se recomienda encarecidamente la utilización de entornos virtuales de Python para aislar las dependencias y evitar conflictos con otros módulos científicos.⁴ La instalación estándar se realiza mediante el gestor de paquetes pip, lo que descarga automáticamente tanto el paquete opengate como el núcleo opengate_core, que contiene las bibliotecas de Geant4 precompiladas.¹

En sistemas Linux o entornos WSL2 de Windows, la instalación puede requerir la desactivación de la verificación SSL en caso de fallos en la descarga de datos de Geant4 mediante el comando `export GIT_SSL_NO_VERIFY=1`.¹ Una vez instalado, la ejecución del comando `opengate_info` inicia la descarga automatizada de las bases de datos de física de Geant4, un proceso que es necesario realizar solo una vez pero que requiere una conexión estable a internet.⁴ Para entornos de clúster donde las bibliotecas gráficas como libGL no están presentes, existe una versión específica sin visualización que puede forzarse mediante `pip install "opengate[novis]"`.⁸

Validación del Sistema y Pruebas de Integridad

Tras la instalación, es imperativo ejecutar la suite de pruebas mediante `opengate_tests` para asegurar que todas las funcionalidades operan correctamente en la arquitectura del hardware específico.¹ Estas pruebas cubren desde la geometría básica hasta sistemas complejos de PET y SPECT. Un punto notable es que ciertas pruebas (como la 034) requieren bibliotecas adicionales como torch y gaga-phsp para el manejo de espacios de fase basados en redes

generativas adversarias (GANs), las cuales deben instalarse de forma independiente para completar la funcionalidad de modelado de fuentes avanzadas.¹

Fase 2: Modelado Físico del Acelerador Lineal de 6 MV

El núcleo del plan para una simulación de radioterapia externa reside en la representación precisa de un cabezal de acelerador lineal (Linac), comúnmente del tipo Elekta Precise o Varian Clinac, operando a una energía nominal de 6 MV.⁹ El modelado se divide tradicionalmente en la parte independiente del paciente, que incluye el blanco, el filtro aplanador y el colimador primario, y la parte dependiente del paciente, que abarca los colimadores secundarios (mordazas) y el volumen del phantom.⁹

Ajuste de los Parámetros del Haz de Electrones Primario

La precisión de la dosis depositada en el paciente está intrínsecamente ligada a las características del haz de electrones que impacta sobre el blanco de tungsteno. Basándose en estudios validados, los parámetros óptimos para un Linac Elekta de 6 MV requieren un ajuste fino de la energía media y el tamaño del punto focal (spot size).¹¹ La energía media influye directamente en la forma de las curvas de dosis en profundidad (PDD), mientras que el tamaño del punto focal determina la penumbra y la forma de los perfiles de dosis laterales.¹¹

Parámetro del Haz	Valor Recomendado	Efecto Dosimétrico Principal
Energía Media	5.8 MeV	Determina la profundidad del máximo de dosis y el gradiente. ¹¹
Distribución de Energía (FWHM)	3% de la Media	Modula la amplitud del espectro de fotones generado. ¹¹
Tamaño de Mancha Focal (FWHM)	3 mm	Controla el ancho de la penumbra y los "cuernos" del perfil. ¹¹
Distribución Espacial	Gaussiana	Simula la dispersión natural del haz de electrones. ¹¹

Este proceso de ajuste se realiza mediante el método de ensayo y error o optimización paramétrica, comparando los resultados de la simulación en un phantom de agua con mediciones experimentales obtenidas mediante cámaras de ionización o detectores de diodo

siguiendo protocolos como el TG-51.¹⁰

Uso de Espacios de Fase para la Eficiencia Computacional

Dada la carga computacional que implica simular el transporte de millones de partículas a través del cabezal del acelerador, es una práctica estándar generar un archivo de espacio de fase (Phase Space) en un plano situado justo por encima de los colimadores secundarios.⁹ Este archivo registra el tipo de partícula, energía, posición y dirección de cada rayo que cruza dicho plano.² En GATE 10, el PhaseSpaceActor se encarga de esta tarea, permitiendo que la parte fija del acelerador se simule una sola vez y los datos resultantes se utilicen como fuente virtual para múltiples configuraciones de campos de tratamiento y geometrías de pacientes, optimizando drásticamente el tiempo de cálculo.²

Fase 3: Integración de Geometría Voxelizada y Phantoms de Pacientes

Para realizar una dosimetría realista, la simulación debe incorporar mapas de atenuación heterogéneos derivados de imágenes de Tomografía Computarizada (CT). GATE 10 ofrece algoritmos de navegación avanzados para el seguimiento de partículas en estos volúmenes voxelizados, siendo el ImageNestedParametrisedVolume la opción recomendada para la mayoría de las aplicaciones de radioterapia por su equilibrio entre uso de memoria y velocidad de ejecución.¹⁴

Calibración Estequiométrica de Unidades Hounsfield

La conversión de las Unidades Hounsfield (HU) del CT a materiales físicos de Geant4 es un proceso crítico que requiere una tabla de calibración de densidades y materiales.¹⁴ Este procedimiento asigna a cada rango de HU una composición elemental y una densidad de masa específica (g/cm^3). Para evitar una ralentización excesiva durante la inicialización de la simulación debido a la creación de miles de materiales ligeramente diferentes, se utiliza el parámetro DensityTolerance, que agrupa voxels con densidades similares en una única definición de material de Geant4, manteniendo la precisión anatómica necesaria para el cálculo de dosis.¹⁴

Optimización del Navegador Regular

El algoritmo de navegación regular en GATE 10 permite una aceleración significativa al realizar una identificación rápida de voxels vecinos sin sobrecarga de memoria.¹⁴ Una característica clave es el método ComputeStepSkippingEqualMaterials, que permite al navegador ignorar las fronteras entre voxels cuando estos comparten el mismo material.¹⁴ En simulaciones de phantoms de agua o regiones extensas de tejido homogéneo, esto reduce drásticamente el número de pasos de transporte por partícula, aumentando la eficiencia de la simulación en

factores que pueden llegar hasta 3 en casos específicos.¹⁴

Fase 4: Configuración de Física y Captura de Datos (Scoring)

La selección de la lista de física (physics list) es fundamental para garantizar la precisión de las interacciones electromagnéticas. Para haces de fotones de 6 MV, el paquete estándar de Geant4 suele ser suficiente y más eficiente computacionalmente, aunque para estudios que requieran mayor detalle en energías bajas o en interfaces de diferentes tejidos, los paquetes de baja energía como Livermore o Penelope son alternativas válidas.⁹

Definición de Cortes de Producción y Límites de Paso

Los cortes de producción (production cuts) determinan el rango mínimo bajo el cual las partículas secundarias no se siguen y su energía se deposita localmente.⁵ Un valor típico de 1 mm en agua para electrones y fotones es compatible tanto con los paquetes de física estándar como con los de baja energía, y suele ser suficiente para capturar los gradientes de dosis en voxels de dimensiones similares (por ejemplo, $5 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$).⁹

Parámetro de Física	Configuración Recomendada	Razón Técnica
Paquete EM	Standard / Opt3	Balance óptimo entre velocidad y precisión en megavoltaje. ⁹
Corte de Rango (World)	1.0 mm	Evita el seguimiento innecesario de partículas de baja energía. ¹¹
Corte de Rango (Phantom)	0.1 - 1.0 mm	Mejora la precisión en el volumen de interés dosimétrico. ¹¹
Límite de Paso	0.5 - 1.0 mm	Garantiza que las interacciones se calculen con suficiente resolución espacial. ⁵

El Uso del DoseActor para Mapas de Dosis

La herramienta principal para la recolección de datos es el DoseActor, el cual construye matrices 3D de energía depositada (MeV) y dosis (Gy).² Una de las innovaciones más potentes de GATE 10 es la capacidad de acceder a estas matrices directamente en la memoria de Python como arreglos de NumPy.³ Esto permite que, dentro del mismo script de ejecución, se puedan realizar cálculos de incertidumbre estadística, normalizaciones al máximo o a la dosis integral, y visualizaciones inmediatas sin necesidad de procesos de lectura/escritura en disco que consumen tiempo.⁶

Fase 5: Desarrollo e Integración de Modelos de Inteligencia Artificial

El plan completo para un proyecto avanzado debe contemplar el uso de modelos sustitutos (surrogates) basados en IA para acelerar o mejorar la calidad de las dosis obtenidas por Monte Carlo. En el periodo 2024-2025, el enfoque se ha centrado en el uso de arquitecturas de aprendizaje profundo para el denoise (eliminación de ruido) de mapas de dosis obtenidos con bajas estadísticas.¹⁷

Arquitecturas de Redes Neuronales y Denoising

La literatura reciente destaca el uso de redes neuronales convolucionales profundas (dCNN) como la MCDNet, específicamente diseñada para el denoising de dosis en 3D.¹⁷ Estas arquitecturas evitan las operaciones de submuestreo (down-sampling) comunes en modelos como U-Net para no perder detalles críticos de la distribución de dosis en las interfaces de tejido.¹⁷ El flujo de trabajo implica alimentar la red con una distribución de dosis de conteo bajo (ruidosa) para que la IA prediga la distribución equivalente de conteo alto (limpia) en milisegundos.¹⁷

Arquitectura AI	Aplicación en Radioterapia	Ventaja Competitiva
3D MCDNet	Denoising de dosis Monte Carlo	Ejecución en ~200ms con alta fidelidad espacial. ¹⁷
Transformers (SegMambaDP)	Predicción de dosis 3D	Captura dependencias anatómicas de largo alcance. ¹⁸
GANs / Diffusion Models	Síntesis de imágenes y dosis	Generación de distribuciones realistas a partir de contornos. ¹⁹

Reinforcement Learning	Planificación adaptativa	Optimización dinámica de ángulos y pesos de haz. ²¹
------------------------	--------------------------	--

Generación de Conjuntos de Datos y Flujo de Inferencia

Para entrenar estos modelos, el investigador debe utilizar GATE 10 como un motor de generación de datos sintéticos. Mediante bucles de Python, se pueden variar automáticamente las anatomías de los pacientes, los ángulos de incidencia de los haces y las energías para crear miles de parejas de "dosis ruidosa - dosis limpia".⁷ Una vez entrenado el modelo, este se puede exportar al formato ONNX e integrarse de nuevo en el ecosistema OpenGate para realizar inferencias en tiempo real durante flujos de trabajo de radioterapia adaptativa.⁷

Fase 6: Análisis de Calidad y Validación mediante Índice Gamma

Ninguna simulación o predicción de IA es válida sin una comparación rigurosa contra un estándar de referencia. El índice Gamma (γ) es la métrica universalmente aceptada para este propósito, evaluando simultáneamente la diferencia de dosis (DD) y la distancia al acuerdo (DTA).²³

Para el "Proyecto Modular 3", es esencial realizar este análisis utilizando herramientas integradas en Python como GateTools o pymedphys.²⁶ El comando `gt_gamma_index` de la suite GateTools permite comparar archivos de imagen .mhd generados por la simulación con criterios estándar (por ejemplo, 3%/3mm o 2%/2mm), devolviendo una tasa de aprobación (pass rate) que debe superar el 95% para considerar la simulación o el modelo de IA como clínicamente aceptable.²⁶

Marco Administrativo y Académico en CUCEI: Proyecto Modular 3 y Tesis

La ejecución técnica descrita anteriormente debe alinearse con los requisitos formales del Departamento de Física de CUCEI. El "Proyecto Modular 3" es la culminación del ciclo de formación por competencias y requiere una presentación formal y un documento técnico riguroso.²⁷

Requisitos de Evaluación y Documentación

Para acreditar el Modular 3, el estudiante debe demostrar capacidad analítica para discutir los resultados obtenidos mediante fundamentos científicos y originalidad en el planteamiento del problema.²⁷ El documento escrito debe seguir la plantilla oficial de LaTeX proporcionada

por la coordinación de la carrera de Física, la cual incluye secciones para introducción, metodología, resultados gráficos y conclusiones.²⁸

Actividad del Proceso	Fecha / Especificación (Ciclo 2025A)	Requisito Crítico
Envío de Proyecto	Hasta el 27 de marzo, 11:00 am	Aval explícito del asesor. ²⁹
Presentación Pública	Del 5 al 9 de mayo	Defensa oral de 15 min + 5 min de preguntas. ²⁹
Formato de Póster	90 x 120 cm (Vertical)	Legibilidad a 2 metros de distancia. ²⁷
Evaluación Modular	Acreditado / No Acreditado	Dictamen por dos profesores designados. ²⁷

Transición a la Titulación: Tesis y Seminario de Investigación

El trabajo desarrollado en el Modular 3 no es un fin en sí mismo, sino una plataforma para la obtención del título profesional. El reglamento de titulación de CUCEI permite que los avances de los proyectos modulares se aprovechen para modalidades como la Tesis o el Seminario de Investigación.³¹

La **Tesis** se define como un trabajo de investigación inédito que aporta nuevos conocimientos o métodos en el campo.³² Si la simulación realizada en GATE 10 introduce una mejora metodológica sustancial, como un nuevo modelo de IA para predicción de dosis o una caracterización novedosa de un haz de partículas, puede registrarse formalmente ante el Comité de Titulación.³¹ Este proceso requiere la solicitud de la modalidad, la propuesta del protocolo y la designación de un jurado para la defensa oral final.³²

Por otro lado, la modalidad de **Seminario de Investigación** busca específicamente capitalizar los resultados de los proyectos modulares que solucionan problemas concretos, permitiendo al pasante desarrollar productos documentales con el mismo valor académico que una tesis en un periodo de tres a seis meses.³¹

Consideraciones Finales sobre el Plan de Ejecución

Este plan integral abarca desde la infraestructura computacional de GATE 10 hasta la validación clínica y la culminación académica en CUCEI. La clave del éxito reside en la transición fluida entre la física de radiación pura (Geant4), la programación moderna

(Python/NumPy) y la innovación tecnológica (Deep Learning). Al seguir este flujo de trabajo, el investigador no solo garantiza una simulación de alta fidelidad para haces de 6 MV, sino que también establece un marco reproducible y escalable que cumple con las más altas exigencias tanto de la comunidad de física médica como de los estándares regulatorios universitarios. La integración de herramientas como el DoseActor, el acceso directo a memoria para arreglos NumPy y la validación mediante índice Gamma automatizada, sitúan al proyecto en la vanguardia de la dosimetría computacional contemporánea.

Fuentes citadas

1. OpenGATE/opengate: Gate 10 - GitHub, acceso: enero 29, 2026, <https://github.com/OpenGATE/opengate>
2. The OpenGATE ecosystem for Monte Carlo simulation in medical physics - PubMed Central, acceso: enero 29, 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11149651/>
3. The new GATE 10 Monte Carlo particle transport simulation software - Part II - arXiv, acceso: enero 29, 2026, <https://arxiv.org/html/2507.09840v1>
4. GATE Documentation — LakminZ documentation, acceso: enero 29, 2026, <https://osksn2.hep.sci.osaka-u.ac.jp/~lakmin/home/gate.html>
5. User Guide — OPENGATE documentation, acceso: enero 29, 2026, https://opengate-python.readthedocs.io/en/master/user_guide/index.html
6. How to: Actors and Filters — OPENGATE documentation - Read the Docs, acceso: enero 29, 2026, https://opengate-python.readthedocs.io/en/10.0.2/user_guide/user_guide_actors.html
7. Guide - OpenGate Documentation, acceso: enero 29, 2026, https://documentation.opengate.es/api/artificial_intelligence/guide/index.html
8. How to: Installation — OPENGATE documentation, acceso: enero 29, 2026, https://opengate-python.readthedocs.io/en/master/user_guide/user_guide_installation.html
9. Simulation of a 6 MV Elekta Precise Linac photon beam using GATE/GEANT4, acceso: enero 29, 2026, https://www.researchgate.net/publication/49768230_Simulation_of_a_6_MV_Elekt_a_Precise_Linac_photon_beam_using_GATEGEANT4
10. Monte Carlo Simulation of a 6 MV X-Ray Beam for Open and Wedge Radiation Fields, Using GATE Code - NIH, acceso: enero 29, 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4236805/>
11. Simulation of a 6 MV Elekta Precise Linac photon beam using GATE ..., acceso: enero 29, 2026, <https://www.creatis.insa-lyon.fr/~dsarrut/articles/Grevillot2011.pdf>
12. Gate/docs/tools_to_interact_with_the_simulation_actors.rst at develop - GitHub, acceso: enero 29, 2026, https://github.com/OpenGATE/Gate/blob/develop/docs/tools_to_interact_with_the_simulation_actors.rst
13. Tools to Interact with the Simulation : Actors - GitLab, acceso: enero 29, 2026, https://gitlab.iaat.uni-tuebingen.de/cpommrantz/Gate/-/blob/v9.3/docs/tools_to_in

- [teract_with_the_simulation_actors.rst](#)
14. Gate/docs/voxelized_source_and_phantom.rst at develop · OpenGATE/Gate - GitHub, acceso: enero 29, 2026, https://github.com/OpenGATE/Gate/blob/develop/docs/voxelized_source_and_phantom.rst
 15. docs/voxelized_source_and_phantom.rst · v9.1 · Christian Pommranz / Gate - GitLab, acceso: enero 29, 2026, https://gitlab.iaat.uni-tuebingen.de/cpommranz/Gate/-/blob/v9.1/docs/voxelized_source_and_phantom.rst
 16. 8. Tools to Interact with the Simulation : Actors - GATE documentation, acceso: enero 29, 2026, https://opengate.readthedocs.io/en/latest/tools_to_interact_with_the_simulation_actors.html
 17. ARCHER-a Monte Carlo code for multi-particle radiotherapy through ..., acceso: enero 29, 2026, https://www.epj-n.org/articles/epjn/full_html/2025/01/epjn20240026/epjn20240026.html
 18. A Review of Dose Prediction Methods for Tumor Radiation Therapy | Semantic Scholar, acceso: enero 29, 2026, <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Review-of-Dose-Prediction-Methods-for-Tumor-Kui-Liu/da802fb3d13d44bd1154da59e0674397b4ee3554>
 19. The Role of Artificial Intelligence in Advancing Theranostics Dosimetry for Cancer Therapy: a Review - NIH, acceso: enero 29, 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12446183/>
 20. PPORLD-EDNetLDCT: A Proximal Policy Optimization-Based Reinforcement Learning Framework for Adaptive Low-Dose CT Denoising - arXiv, acceso: enero 29, 2026, <https://arxiv.org/html/2509.03185v1>
 21. Leveraging Advanced AI Technologies for Radiotherapy Dose ..., acceso: enero 29, 2026, <https://brieflands.com/journals/tatm/articles/167315>
 22. Artificial Intelligence Dose Calculation Engine Based Pencil-beam for Intensity Modulated Radiation Therapy - ICCR 2024, acceso: enero 29, 2026, <https://www.iccr2024.org/papers/524426.pdf>
 23. Gamma Index Analyse — FRED Tools 0.7.28 documentation, acceso: enero 29, 2026, <https://fredtools.ifj.edu.pl/Documentation/gammaIndexAnalyse.html>
 24. Gamma - pylinac 3.40.0 documentation, acceso: enero 29, 2026, <https://pylinac.readthedocs.io/en/latest/topics/gamma.html>
 25. Gamma - PyMedPhys, acceso: enero 29, 2026, <https://docs.pymedphys.com/users/ref/lib/gamma.html>
 26. OpenGATE/GateTools: Python tools and functions for Gate - GitHub, acceso: enero 29, 2026, <https://github.com/OpenGATE/GateTools>
 27. Presentaciones de Proyectos Modulares | Licenciatura en Física - CUCEI, acceso: enero 29, 2026, <https://www.cucei.udg.mx/carreras/fisica/proyectos-modulares>
 28. Descarga la Plantilla para Proyectos Modulares | Licenciatura en Física - CUCEI - Universidad de Guadalajara, acceso: enero 29, 2026, <https://www.cucei.udg.mx/carreras/fisica/documento/descarga-la-plantilla-para->

[proyectos-modulares](#)

29. CONVOCATORIA PROYECTOS MODULARES LIFI - Google, acceso: enero 29, 2026,
<https://sites.google.com/academicos.udg.mx/convocatoria-modulares-lifi/convocatoria-pm>
30. PROYECTOS MODULARES Modalidad: TRABAJO DE INVESTIGACIÓN - CUCEI - Universidad de Guadalajara, acceso: enero 29, 2026,
https://www.cucei.udg.mx/carreras/farmaceutica/sites/default/files/lineamiento_2024_investigacion.pdf
31. Modalidades de titulación | Ingeniería Química - CUCEI, acceso: enero 29, 2026,
<https://www.cucei.udg.mx/carreras/ingquimica/es/alumnos/titulacion/modalidades-de-titulacion>
32. Tesis e Informes | Ingeniería en Computación - CUCEI - Universidad de Guadalajara, acceso: enero 29, 2026,
<https://www.cucei.udg.mx/carreras/computacion/es/tesis-e-informes>
33. REGLAMENTO GENERAL DE TITULACIÓN DE LA UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA Artículo 4. Los preceptos que contiene el presente capítulo - CUCEI, acceso: enero 29, 2026,
https://www.cucei.udg.mx/carreras/civil/sites/default/files/adjuntos/reglamento_de_titulacion_cucei.pdf
34. Página 1 de 12 REGLAMENTO DE TITULACIÓN DEL CENTRO UNIVERSITARIO DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍAS Capítulo I De las disposiciones - Universidad de Guadalajara, acceso: enero 29, 2026,
https://www.cucei.udg.mx/sites/default/files/adjuntos/reglamento_de_titulacion.pdf