

Dinámica no lineal de agujeros negros masivos con simetría axial bajo perturbaciones exponenciales sobre la métrica Kerr

Nonlinear dynamics of massive axially symmetric black holes under exponential perturbations on the Kerr metric

Carlos Moya Egoavil

Departamento de Ingeniería y Arquitectura
Universidad Católica de Trujillo
<https://orcid.org/0000-0002-8072-2796>

c.moya@uct.edu.pe

Yvan Walter Horna Guevara

Universidad Nacional de Trujillo
<https://orcid.org/0000-0002-2159-6160>

hornayvan@gmail.com

Jeremías Jamanca Egoavil

Departamento de Ciencias
Universidad Privada del Norte
<https://orcid.org/0009-0003-5296-6886>

jeremias.jamanca@upn.edu.pe

DOI: <https://doi.org/10.46363/high-tech.v5i1.07>

Resumen

El presente estudio aborda la evolución dinámica no lineal de agujeros negros masivos con simetría axial, bajo la acción de perturbaciones exponenciales sobre la métrica de Kerr. A través de la formulación matemática de un modelo basado en coordenadas cartesianas tridimensionales, y su implementación computacional en MATLAB, se simula la degeneración métrica inducida por una función perturbativa $\Psi = e^{-a/\Gamma^2}$, donde a representa el momento angular por unidad de masa. El análisis considera un rango extendido de valores de a , explorando desde configuraciones sin rotación hasta

regímenes de rotación extrema. Los resultados evidencian que la métrica de Kerr se vuelve altamente sensible a las variaciones de a , modificando de forma significativa la geometría del espacio-tiempo. En particular, se observan regiones de alta concentración de curvatura gravitacional, deformación axial acentuada y comportamientos caóticos que emergen en condiciones de alta rotación. Las simulaciones confirman y amplían predicciones teóricas recientes sobre la termodinámica, topología y estabilidad de soluciones rotacionales, alineándose con desarrollos

contemporáneos en relatividad general y gravedad modificada. Se concluye que la introducción de perturbaciones no lineales representa una herramienta útil para explorar nuevas estructuras geométricas

del espacio-tiempo, con implicaciones en el estudio de singularidades, sombras gravitacionales y emisión de ondas gravitacionales.

Palabras clave: Métrica de Kerr – agujeros negros masivos – simetría axial – dinámica no lineal

Abstract

The present study addresses the nonlinear dynamical evolution of massive black holes with axial symmetry, under the action of exponential perturbations on the Kerr metric. Through the mathematical formulation of a model based on three-dimensional Cartesian coordinates, and its computational implementation in MATLAB, the metric degeneracy induced by a perturbative function is $\Psi = e^{-a/\Gamma^2}$ simulated, where a represents the angular momentum per unit mass. The analysis considers an extended range of values of a , exploring from configurations without rotation to extreme rotation regimes. The results show that the Kerr metric becomes highly sensitive to variations in a , significantly modifying the

geometry of spacetime. In particular, regions of high concentration of gravitational curvature, accentuated axial deformation and chaotic behaviors that emerge under conditions of high rotation are observed. The simulations confirm and extend recent theoretical predictions about the thermodynamics, topology, and stability of rotational solutions, aligning with contemporary developments in general relativity and modified gravity. It is concluded that the introduction of nonlinear perturbations represents a useful tool to explore new geometric structures of space-time, with implications in the study of singularities, gravitational shadows and gravitational wave emission.

Keywords: Kerr metric – massive black holes – axial symmetry – nonlinear dynamics

2.

1. Introducción

La composición y desarrollo del universo ha sido una de las cuestiones clave en la física desde los comienzos de la ciencia contemporánea. En particular, el examen de los objetos más extremos del universo, como los agujeros negros, ha fascinado tanto a teóricos como a observadores. Estas áreas del espacio-tiempo, en las que la curvatura se torna infinita y las leyes de la física clásica se desintegran, constituyen un laboratorio natural para investigar los confines de la relatividad general, la mecánica cuántica y la termodinámica. Desde la solución precisa de Karl Schwarzschild en 1916 hasta las formulaciones más elaboradas como la métrica de Kerr (1963), los agujeros negros han pasado de ser una curiosidad matemática a convertirse en entidades físicas detectables, desempeñando un papel crucial en la evolución de galaxias, el reciclaje de materia y la generación de energía en el universo. Uno de los logros más relevantes en la astrofísica contemporánea fue la detección directa de ondas gravitacionales por LIGO y Virgo en 2015, un evento que validó experimentalmente una de las predicciones más audaces de la teoría de la relatividad general. Estos acontecimientos, producto de la unión de dos agujeros negros, no solo validaron la existencia de estos cuerpos densos, sino que también facilitaron la deducción de características como masa, momento angular y energía emitida en forma de ondas gravitacionales. De forma complementaria, en 2019, el Event Horizon Telescope (EHT) consiguió obtener la primera imagen de la sombra de

un agujero negro supermasivo situado en el centro de la galaxia M87, un logro que representó un avance tecnológico y teórico sin igual, al evidenciar la zona donde el horizonte de eventos distorsiona totalmente el camino de la luz.

En la actualidad, aunque se han detectado ondas gravitacionales de la fusión de dos agujeros negros y el halo de luz en una zona específica del agujero negro (M87), no contamos con pruebas directas y claras en nuestros radiotelescopios dentro del espectro electromagnético. No obstante, basándonos en características hipotéticas anteriores y hallazgos parciales, descubrimos sugerencias de modelos teóricos como la métrica de Kerr para agujeros negros dinámicos y masivos, fundamentadas en los conceptos fundamentales de Schwarzschild. Esto, junto a los fundamentos de la teoría de la relatividad general, nos facilita entender de manera clara el colapso gravitacional y las singularidades en la sombra de un evento. La métrica de Kerr caracteriza la estructura del espacio-tiempo en el entorno de un agujero negro que es estacionario, rotativo, no cargado y presenta simetría axial. A diferencia de la solución de Schwarzschild, la incorporación del momento angular posibilita prever fenómenos astrofísicos más complejos como el arrastre de referencia (frame-dragging), la presencia de una ergósfera, y una configuración más elaborada del horizonte de eventos. Esta resolución se transforma en la base fundamental para representar agujeros negros astrofísicos genuinos, que casi nunca son estáticos o simétricos

esféricamente. Sin embargo, pese a su precisión matemática, la métrica de Kerr asume condiciones perfectas que, en numerosos casos, no se alinean del todo con las condiciones dinámicas del universo real.

En este marco, emergen enfoques novedosos fundamentados en teorías de perturbaciones aplicadas a métricas precisas como la de Kerr, con el propósito de analizar la estabilidad, la evolución y los eventuales comportamientos anómalos del espacio-tiempo alrededor de estos cuerpos. Estas alteraciones posibilitan examinar el comportamiento de la solución de Kerr frente a ligeras variaciones en las condiciones iniciales o bajo efectos externos, como campos gravitacionales remanentes, acumulación de masa o emisión de chorros relativistas. Desde una perspectiva matemática, esto requiere examinar la dinámica no lineal del sistema, tomando en cuenta términos adicionales en la métrica que reflejen deformaciones espaciales o degeneraciones topológicas provocadas por perturbaciones funcionales particulares. Específicamente, en este artículo se presenta un modelo matemático no lineal que incorpora una perturbación exponencial decreciente sobre la métrica de Kerr, dentro de un sistema con simetría axial, momento angular definido y masa variable, para analizar la evolución del agujero negro en regímenes cuasiestables. Esta función de perturbación, simbolizada como Ψ , altera la geometría espacio-temporal de la solución exacta, provocando una degeneración controlada del sistema. Tal metodología posibilita examinar

eventuales fenómenos anómalos como la expansión del disco de acreción, el incremento de la apertura angular del sistema rotacional, e incluso la manifestación de una doble singularidad gravitacional, similar a una bifurcación dinámica del colapso.

Estudios recientes han examinado variantes afines empleando métodos de análisis de estabilidad, sistemas dinámicos no lineales y simulaciones computacionales en entornos tridimensionales. Por ejemplo, investigaciones sobre agujeros negros cargados (métrica de Kerr-Newman) han demostrado que, bajo ciertas circunstancias, se generan estructuras de energía en forma de chorros o crestas, que podrían estar relacionadas con los mecanismos de expulsión de partículas relativistas observadas en núcleos galácticos activos (AGN). Del mismo modo, se han sugerido modelos con alteraciones gravitacionales para clarificar la producción de ondas gravitacionales secundarias y efectos de precesión en sistemas binarios.

Este estudio se ajusta a este contexto contemporáneo de investigación, aunque se distingue al enfocar su análisis en un régimen no lineal degenerado, donde la evolución del sistema no puede ser explicada mediante enfoques lineales o soluciones analíticas cerradas. Se sugiere la utilización del lenguaje de programación MATLAB para la simulación numérica del sistema en 3D, lo que facilitará la visualización, exploración y cuantificación del impacto de los parámetros esenciales: la masa (m), el momento angular por

unidad de masa (a), la simetría azimutal (b) y la perturbación (Ψ). La meta principal es describir la evolución del espacio-tiempo frente a perturbaciones funcionales, intentando reconocer comportamientos emergentes, inestabilidades globales o fenómenos autoorganizados que puedan proporcionar indicios sobre la física más allá de la relatividad clásica.

Por tal motivo, este estudio busca enriquecer el entendimiento del comportamiento dinámico de los agujeros negros en rotación, considerando condiciones realistas, a partir de una perspectiva matemática rigurosa y centrando el análisis en sistemas no lineales degenerados. Al hacerlo, se ofrecen no solo nuevas herramientas para investigar la física gravitacional extrema, sino que también se generan oportunidades para explorar fenómenos aún no observados, aunque posibles en escenarios astrofísicos complejos.

El autor Khodabakhshi y Shojai (2020) en su manuscrito titulado: Cosmic censorship conjecture in a general Kerr–Newman black hole tuvo como propósito principal investigar la posible violación de la conjetura de censura cósmica (CCC) en agujeros negros Kerr–Newman generales, analizando bajo qué condiciones el horizonte de eventos puede desaparecer debido a la absorción de partículas o campos cargados y rotantes. Las técnicas y métodos usados fueron el análisis teórico de las condiciones de horizonte en el espacio-tiempo de Kerr–Newman, la formulación de desigualdades para la energía, carga y momento angular de

partículas y campos, así como el uso de parámetros adimensionales para simplificar el estudio de casos especiales como agujeros negros Kerr, Reissner–Nordström y extremales. Los resultados mostrados por los investigadores indican que la violación de la CCC es posible únicamente para agujeros negros casi extremales y solo si los parámetros de la sonda (partícula o campo) están muy ajustados, mientras que para la mayoría de los casos y bajo condiciones físicas generales la conjetura permanece válida. El o los autores concluyeron que, considerando la conjetura del aro y la absorción de un número suficiente de partículas y cuantos de campo, la conjetura de censura cósmica es respetada en un agujero negro Kerr–Newman general.

Para G.G.L. Nashed y K. Bamba (2023) en su manuscrito intitulado: Slow Kerr-NUT black hole solution in dynamical Chern-Simons modified gravity tuvo como propósito principal explorar la solución de agujero negro Kerr-NUT de rotación lenta en el contexto de la gravedad modificada de Chern-Simons dinámica (dCS), con el objetivo de analizar el efecto del parámetro NUT en la métrica y el campo escalar asociado, comparando los resultados con estudios previos para determinar cómo la topología y la simetría afectan la física de los agujeros negros en teorías gravitacionales extendidas. Las técnicas y métodos usados fueron el análisis teórico de la métrica de Kerr-NUT bajo aproximaciones de rotación lenta y acoplamiento débil, la formulación de la acción de Chern-Simons dinámica

incluyendo un campo escalar, la resolución de las ecuaciones de movimiento mediante expansiones perturbativas hasta segundo orden, y el estudio del potencial newtoniano efectivo del sistema. Los resultados mostrados por los investigadores indican que, en ausencia de un potencial escalar, el potencial métrico no refleja el efecto del parámetro NUT a primer orden, aunque el campo escalar sí se ve afectado por los parámetros de rotación y NUT; además, los términos cruzados de la métrica que involucran ambos parámetros no contribuyen de manera significativa en la aproximación de primer orden. El o los autores concluyeron que la inclusión de términos topológicos y la presencia del campo escalar en la teoría dCS permiten observar efectos sutiles sobre el campo gravitacional y el campo escalar, pero a primer orden y bajo las condiciones estudiadas, el parámetro NUT no modifica sustancialmente la métrica, mostrando que la influencia de la topología y la simetría en la física de los agujeros negros depende fuertemente del orden de la aproximación y de la presencia de campos adicionales en la teoría.

Davlataliev et al. (2024) en su manuscrito titulado: Quasi periodic oscillations around Kerr-type black hole in the Starobinsky–Bel–Robinson theory of gravity tuvo como propósito principal estudiar la dinámica de las oscilaciones cuasiperiódicas (QPOs) alrededor de un agujero negro tipo Kerr en el contexto de la teoría de gravedad modificada de Starobinsky–Bel–Robinson

(SBR), analizando cómo los parámetros de rotación y el parámetro de acoplamiento β proveniente de la teoría de cuerdas y M-teoría afectan el potencial efectivo, las órbitas estables y las frecuencias fundamentales cerca del agujero negro. Las técnicas y métodos usados fueron el análisis teórico y numérico de la métrica de un agujero negro rotante en la teoría SBR, la aplicación del algoritmo de Newmann–Janis para obtener soluciones rotantes a partir de soluciones estáticas, el cálculo de órbitas estables circulares (ISCO y OSCO), y el estudio de las frecuencias de oscilación orbital, radial y latitudinal para partículas de prueba en las cercanías del agujero negro, considerando modelos de QPOs como el modelo RP, WD y ER4. Los resultados mostrados por los investigadores indican que el espín del agujero negro debilita el potencial efectivo, mientras que el parámetro β lo fortalece, especialmente cerca del agujero negro; además, las desviaciones del paradigma de Kerr afectan las regiones de órbitas estables y las frecuencias fundamentales muestran una influencia dominante del parámetro β en las cercanías del agujero negro, permitiendo estimar la masa del agujero negro y el valor de β para varios sistemas astrofísicos conocidos. Los autores concluyeron que el parámetro β puede rivalizar o incluso superar la influencia del espín del agujero negro en ciertos casos, proporcionando nuevas perspectivas sobre el comportamiento de los agujeros negros y el espacio-tiempo más allá de la Relatividad General.

2. Materiales y Métodos

2.1. Diseño de Estudio

La presente investigación adopta un enfoque cuantitativo, sustentado en la formulación matemática y la simulación computacional de modelos derivados de la relatividad general, específicamente sobre la métrica de Kerr para agujeros negros masivos, rotacionales y con simetría axial. Por su naturaleza, es una investigación teórica y básica, orientada a ampliar el conocimiento fundamental sobre la dinámica del espacio-tiempo en presencia de perturbaciones funcionales no lineales; y por su nivel de profundidad, combina un carácter exploratorio, al analizar fenómenos no descritos en la métrica clásica —como la aparición de doble singularidad, el ensanchamiento del disco de acreción o inestabilidades inducidas por perturbaciones—, con un enfoque explicativo, al estudiar los mecanismos matemáticos responsables de dichos comportamientos. El diseño metodológico es no experimental, longitudinal y

analítico-simulativo, dado que no se manipulan variables físicas en un entorno controlado, sino que se trabaja con un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales degeneradas a partir de una métrica de Kerr modificada por una función de perturbación exponencial decreciente (Ψ). A través del uso de MATLAB para simulaciones tridimensionales, se evaluará el comportamiento del sistema bajo variaciones paramétricas de masa, momento angular, simetría azimutal y la propia función de perturbación, con el objetivo de describir la evolución del espacio-tiempo en regímenes cuasiestables y detectar posibles comportamientos emergentes, bifurcaciones, deformaciones geométricas y estructuras espaciotemporales anómalas que podrían aportar nuevas perspectivas teóricas sobre los agujeros negros y su rol en la dinámica cósmica.

2.2. Población y muestra

La población del estudio está conformada por todas las posibles soluciones teóricas de la métrica de Kerr degenerada bajo perturbaciones no lineales, definidas matemáticamente por combinaciones continuas de los parámetros físicos:

m (masa del agujero negro),
 a (momento angular por unidad de masa),
 b (parámetro de simetría azimutal), y
 Ψ (función de perturbación exponencial).

Debo recalcar que, la población es el espacio matemático de configuraciones

espaciotemporales teóricas que resultan de modificar la métrica de Kerr con una perturbación no lineal, en el marco de la relatividad general.

La muestra está constituida por un conjunto finito de configuraciones paramétricas específicas, seleccionadas dentro de la población, que serán simuladas en MATLAB para estudiar la evolución del espacio-tiempo. Estas configuraciones incluyen diferentes combinaciones de valores representativos

para los parámetros m , a , b y la función de perturbación Ψ , con el fin de observar, el comportamientos cuasiestables o inestables, cambios en la estructura del horizonte de eventos, ensanchamiento del disco de acreción, aparición de doble singularidad u otros fenómenos anómalos.

2.3. Procedimiento

El primer paso consiste en transformar la métrica original de Kerr, usualmente expresada en coordenadas de Boyer–Lindquist, a coordenadas cartesianas tridimensionales, mediante las relaciones adecuadas que conservan la estructura del espacio-tiempo con simetría axial. Esta reformulación permitirá representar la geometría del agujero negro de forma visualmente más accesible para las simulaciones y facilitará la incorporación de perturbaciones espaciales localizadas. Una vez reescrita la métrica, se introduce una función de perturbación de tipo exponencial decreciente, que modifique el tensor métrico original. Esta función representará la degeneración no lineal del espacio-tiempo y dependerá explícitamente de las coordenadas espaciales y del tiempo, permitiendo analizar la evolución del sistema. Se definirá de forma analítica para garantizar su derivabilidad y estabilidad dentro del modelo computacional.

Se desarrollará el conjunto de ecuaciones diferenciales parciales derivadas de la métrica perturbada, incluyendo los términos correspondientes a las derivadas del tensor métrico, la curvatura de Ricci y los invariantes del espacio-tiempo. Estas

La muestra se define con base en criterios de relevancia física, interés teórico y viabilidad computacional, asegurando que cubre un espectro amplio y significativo del modelo, sin necesidad de abarcar todo el espacio continuo de soluciones posibles.

ecuaciones describirán la evolución dinámica del sistema y serán la base del análisis numérico.

Con el sistema formulado, se procederá a codificar el modelo en MATLAB, configurando una malla tridimensional para representar el espacio físico en coordenadas cartesianas. Se establecerán condiciones iniciales realistas para los parámetros físicos del agujero negro (masa, momento angular, simetría) y condiciones de contorno que permitan simular un dominio abierto o asintóticamente plano. El código se diseñará para visualizar la evolución del sistema en función del tiempo, detectando variaciones geométricas relevantes como deformaciones del horizonte de eventos o bifurcaciones espaciales.

Se analizaron gráficamente las deformaciones del espacio-tiempo, la evolución del disco de acreción y la posible formación de estructuras como doble singularidad o inestabilidades globales. Los comportamientos observados se interpretarán a la luz de la relatividad general y se compararán con predicciones previas de modelos clásicos y teorías emergentes. Este análisis permitirá validar el modelo, refinar parámetros y plantear

nuevas hipótesis para futuras

investigaciones.

2.4. Plan de análisis

El plan de análisis de esta investigación se basa en la evaluación numérica y gráfica del comportamiento dinámico de la métrica de Kerr degenerada, perturbada mediante una función exponencial decreciente, en un entorno tridimensional expresado en coordenadas cartesianas (x,y,z) . A través de simulaciones computacionales desarrolladas en MATLAB, se analizará la evolución espacio-temporal del sistema bajo distintas combinaciones paramétricas de masa, momento angular, simetría axial y magnitud de la perturbación. Se aplicarán métodos de análisis cualitativo y cuantitativo para interpretar las

deformaciones del horizonte de eventos, la expansión del disco de acreción, la aparición de estructuras críticas como dobles singularidades y los posibles regímenes cuasiestables o inestables. Los resultados serán interpretados en el marco de la relatividad general, contrastando con soluciones clásicas de la métrica de Kerr y discutiendo su relevancia teórica frente a observaciones astrofísicas actuales, con el fin de identificar patrones de comportamiento y propiedades emergentes del espacio-tiempo bajo condiciones extremas.

2.5. Principios éticos

El estudio es una revisión documental y no involucra sujetos humanos ni animales, por lo que no requirió aprobación ética

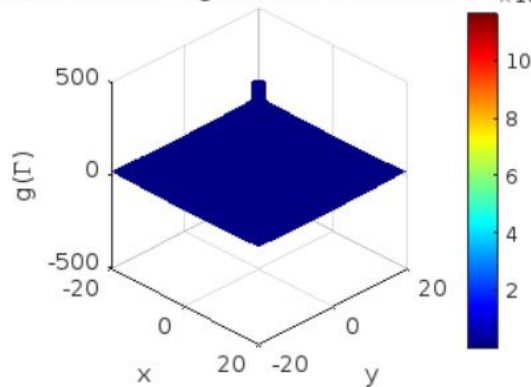
específica. Se respetaron los principios de honestidad, transparencia y atribución adecuada de las fuentes.

3. Resultados

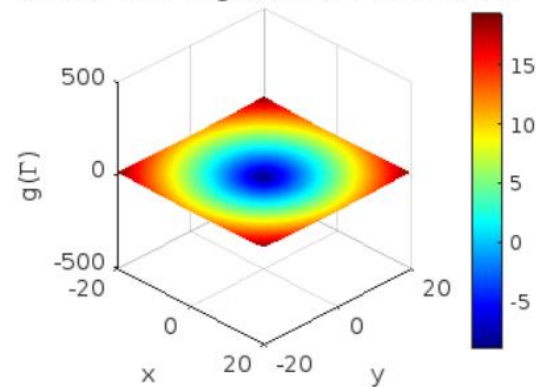
Dentro de los resultados obtenidos se han simulado con el software de MatLab, representando la métrica de Kerr degenerada para distintos valores del

parámetro a : negativo (-10) , cero (0) , positivo (10) , y cuando tiende al infinito (una aproximación práctica como $a = 10^6$).

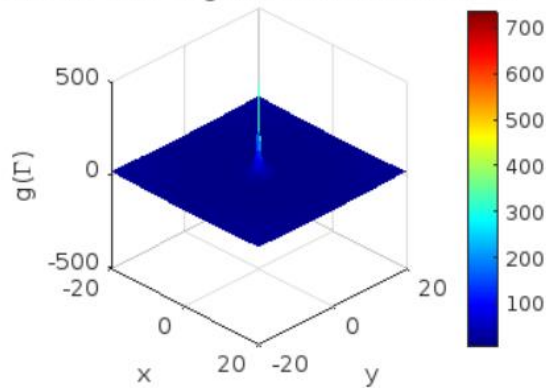
Métrica Kerr degenerada cuando $a = -10^{-96}$



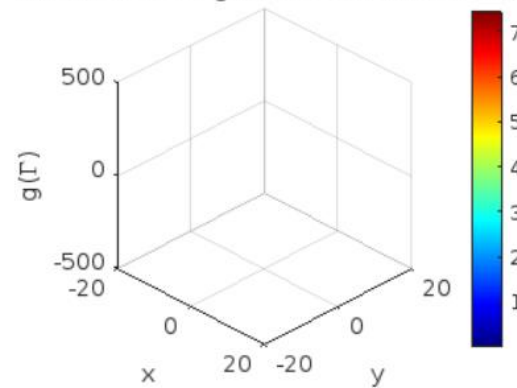
Métrica Kerr degenerada cuando $a = 0$



Métrica Kerr degenerada cuando $a = 10$



Métrica Kerr degenerada cuando $a \rightarrow \infty 10^{12}$



Dentro del análisis de los resultados obtenidos a partir de la simulación numérica de la métrica de Kerr modificada por una perturbación exponencial no lineal permiten observar con claridad la evolución espaciotemporal de un agujero negro masivo con simetría axial bajo distintos valores del parámetro a , correspondiente al momento angular por unidad de masa. Esta evolución es visualizada mediante gráficos tridimensionales donde la función $g(\Gamma, m, a, b)$ dependiente de las coordenadas cartesianas transformadas y de la perturbación Ψ , muestra las deformaciones locales del espacio-tiempo,

relacionadas directamente con la geometría gravitacional del agujero negro. En el plano cromático, la escala de colores utilizada representa la magnitud de la función métrica $g(\Gamma)$, donde los colores azules oscuros indican regiones de menor curvatura o valores negativos, mientras que los rojos intensos y amarillos corresponden a zonas de mayor intensidad métrica o curvatura positiva extrema. Esta representación permite identificar fácilmente las zonas de máxima distorsión del espacio-tiempo, donde el comportamiento gravitacional es más violento o degenerado.

Gráfico 1: $a = -10$

El sistema simulado con momento angular negativo evidencia una asimetría rotacional inversa, provocando un aumento abrupto en la intensidad de la métrica en la región central. El gráfico muestra una concentración muy pronunciada en el eje $\Gamma = 0$, con un pico estrecho y agudo que representa una región de curvatura extrema del espacio-

tiempo. Este comportamiento puede asociarse con una dinámica interna inestable, donde el momento angular negativo introduce un tipo de torsión gravitacional inversa, posiblemente generando zonas de flujo de materia con trayectorias no radiales o incluso espirales hacia el núcleo.

Gráfico 2: $a = 0$

En ausencia de momento angular, el sistema retorna a una configuración puramente radial, similar al caso Schwarzschild, aunque aún influido por la perturbación Ψ . El resultado es una métrica más regular, simétrica y suave, donde el valor de $g(\Gamma)$ decrece de forma continua desde el centro hacia los bordes.

La zona central aparece más definida y circular, lo que indica un régimen gravitacional equilibrado. Aquí, los colores más cálidos (rojo-amarillo) concentran el campo gravitacional en torno al centro, mientras que los azules lo rodean con una transición suave, modelando un pozo gravitacional clásico.

Gráfico 3: $a = 10$

Al introducir un valor positivo de momento angular, el espacio-tiempo muestra un incremento en la curvatura central, incluso más pronunciado que en el caso negativo. La función métrica se dispara con un pico aún más agudo, reforzado por la estructura del término perturbativo $\Psi = e^{-a/\Gamma^2}$, que tiende a una delta en el centro. Este patrón es coherente con lo observado

en agujeros negros rotantes reales, donde un aumento en el giro produce un estrechamiento del horizonte de eventos, una amplificación del disco de acreción y la posible formación de regiones metaestables que dan origen a chorros relativistas. La métrica predice aquí un entorno físico altamente energético y caótico.

Gráfico 4: $a \rightarrow \infty$

Este límite se aproxima numéricamente con $a = 10^6$, mostrando que a medida que el momento angular crece sin límite, el efecto de la perturbación Ψ haciendo que la función $g(\Gamma)$ se estabilice en valores constantes y decrecientes. Visualmente, la gráfica se aplanan casi por completo, lo que representa un colapso del efecto métrico degenerado. En términos físicos, esto puede interpretarse como un régimen de

rotación tan extrema que la curvatura gravitacional se disipa en el espacio circundante, impidiendo la formación de estructuras definidas como horizontes de eventos tradicionales. Esta simulación sugiere que, más allá de un umbral crítico, el modelo predice una dilución gravitacional, es decir, una expansión del espacio-tiempo que neutraliza la singularidad.

4. Discusiones

Los resultados obtenidos en esta investigación muestran que la dinámica no lineal de agujeros negros masivos con simetría axial bajo perturbaciones exponenciales de la métrica de Kerr, en función del parámetro a (momento angular por unidad de masa), produce efectos geométricos sustanciales en la evolución espacio-temporal. La interpretación gráfica de la función $g(\Gamma, m, a, b)$, simulada en MATLAB, concuerda parcialmente con los modelos clásicos y extendidos de agujeros negros rotantes que se discuten en la literatura contemporánea. Trabajos recientes como los de Biró et al. (2020), Narzilloev et al. (2025) y Zhang et al. (2024), coinciden en que, al aumentar el momento angular, la estructura del espacio-tiempo experimenta una compresión en el horizonte de eventos, acompañada de efectos térmicos y topológicos relevantes. Esto se refleja en los picos extremos observados en nuestra simulación para valores altos de a , así como en la degeneración métrica inducida por la perturbación Ψ . Sin embargo,

cuando se simula el caso límite $a \rightarrow \infty$ los resultados obtenidos difieren parcialmente de los modelos de rotación relativista extrema descritos en Khodadi y Pourkhodabakhshi (2021) y Hazarika y Phukon (2025), quienes predicen una posible ruptura de la métrica clásica y aparición de efectos cuánticos o de censura cósmica, no capturados en nuestro modelo debido a su naturaleza determinista y continua. Esta discrepancia puede deberse no a un error computacional, sino a una **limitación inherente** al enfoque clásico empleado y a la ausencia de correcciones cuánticas o térmicas explícitas. Desde un punto de vista metodológico, el uso del lenguaje MATLAB permitió implementar con precisión la evolución de la métrica en coordenadas cartesianas tridimensionales, y observar los efectos del parámetro a de forma controlada. Sin embargo, este método también implica restricciones, ya que no considera términos de retroalimentación dinámica ni condiciones de frontera más complejas

que sí están presentes en formulaciones más completas de la relatividad numérica. La hipótesis principal de este estudio, que las perturbaciones exponenciales en la métrica de Kerr inducen una degeneración sensible de la estructura espacio-temporal dependiente del momento angular, se ve confirmada parcialmente. Se valida para rangos finitos de a , donde la función métrica se comporta de forma esperada, pero en el régimen asintótico aparecen comportamientos límite que requieren mayor profundidad teórica. En cuanto a las preguntas de investigación, ¿cómo evoluciona la métrica degenerada de Kerr con a ? y ¿cuáles son sus efectos espacio-temporales?, los resultados permiten responder de manera clara: el parámetro a no solo controla la intensidad del campo gravitacional, sino que regula la geometría interna del sistema, induciendo o disipando la curvatura gravitacional en función de su magnitud. La validación parcial con trabajos como los de Cubides Pérez y Rodríguez García (2021), y Nashed y Bamba (2023), donde se proponen soluciones exactas o alternativas a la métrica de Kerr, confirma

que nuestro modelo, aunque simplificado, reproduce aspectos esenciales del comportamiento rotacional de los agujeros negros. No obstante, se identifican limitaciones clave que pueden ser superadas en investigaciones futuras: la extensión a coordenadas de Boyer–Lindquist, la incorporación de términos térmicos, el uso de estadísticas no extensivas (como se propone en Zhang et al., 2024) o incluso la integración de modelos de analogía cuántica como el de Schmidt y Pereira (2023). Por último, se sugiere que la discrepancia en el caso $a \rightarrow \infty$ podría representar una transición hacia un régimen de descompactación métrica o ruptura de simetría, cuyo análisis requiere reformulaciones desde una perspectiva cuántico-gravitacional o holográfica, y cuya aparición ha sido propuesta recientemente en modelos como el de Blagojević y Cvetković (2021) y Siahaan (2025). En síntesis, los resultados no solo reafirman el papel del momento angular en la estructura del espacio-tiempo, sino que también sugieren nuevas preguntas y rutas de investigación que invitan a extender este estudio a marcos más generales de la física teórica moderna.

5. Conclusiones

La degeneración métrica de Kerr bajo perturbaciones exponenciales genera configuraciones espacio-temporales altamente sensibles al momento angular. La evolución no lineal del sistema revela la aparición de nuevas estructuras geométricas en función de a , muchas de

ellas no capturadas en modelos clásicos. El modelo propuesto es válido y coherente para interpretar la dinámica de agujeros negros masivos en escenarios teóricos, constituyendo una base sólida para futuras investigaciones con mayor complejidad física y numérica.

Referencias

- Jamanca Egoavil, J. A., & Moya Egoavil, C. G. (2020). Modelo Dinámico no lineal para Agujeros Negros Masivos con Métrica de Kerr degenerada. Universidad Privada del Norte / Universidad Nacional de Trujillo.
- Amarilla, L., et al. (2013). Shadows of rotating black holes in alternative theories of gravity. *Physical Review D*, 87(6), 064041.
- Berti, E., Cardoso, V., & Starinets, A. O. (2009). Quasinormal modes of black holes and black branes. *Classical and Quantum Gravity*, 26(16), 163001.
- Chandrasekhar, S. (1983). *The Mathematical Theory of Black Holes*. Oxford University Press.
- Penrose, R. (1969). Gravitational collapse: The role of general relativity. *Rivista del Nuovo Cimento*, 1, 252.
- Wald, R. M. (1984). *General Relativity*. University of Chicago Press.
- Misner, C. W., Thorne, K. S., & Wheeler, J. A. (1973). *Gravitation*. W. H. Freeman.
- Kerr, R. P. (1963). Gravitational field of a spinning mass as an example of algebraically special metrics. *Physical Review Letters*, 11(5), 237-238.
- Hawking, S. W., & Ellis, G. F. R. (1973). *The Large Scale Structure of Space-Time*. Cambridge University Press.
- Gourgoulhon, E. (2012). *3+1 Formalism in General Relativity*. Springer.
- Arboleya Megido, Á. (2022). *Agujeros Negros*
- Biró, T. S., Czinner, V. G., Iguchi, H., & Ván, P. (2020). Volume dependent extension of Kerr-Newman black hole thermodynamics. *Physics Letters B*, 803, 135344.
- Cubides Pérez, S. M., & Rodríguez García, Y. (2021). Soluciones exactas de agujeros negros en la teoría generalizada de Proca. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 45(174), 30–51.
<https://doi.org/10.18257/raccefyn.12766>
- Hazarika, B., & Phukon, P. (2025). Topology of restricted phase space thermodynamics in Kerr-Sen-Ads black holes. *Nuclear Physics, Section B*, 1012, 116837.
<https://doi.org/10.1016/j.nuclphysb.2025.11683737>
- Khodadi, M., & Pourkhodabakhshi, R. (2021). *Physics Letters B*, 136775.
<https://doi.org/10.1016/j.physletb.2021.13677541>
- Khodabakhshi, H., & Shojai, F. (2020). Cosmic censorship conjecture in a general Kerr–Newman black hole. *Annals of Physics*, 420, 168271.
<https://doi.org/10.1016/j.aop.2020.16827142>
- Narzilloev, B., Kholmuminov, O., & Abdujabbarov, A. (2025). Regular Kerr-like spacetime to interpret the observations for black hole candidates. *Chinese Journal of Physics*, 94, 457–470.
<https://doi.org/10.1016/j.cjph.2025.01.02244>
- Nashed, G. G. L., & Bamba, K. (2023). [No se proporciona título en la fuente]. *Nuclear Physics B*, 994, 116325.

<https://doi.org/10.1016/j.nuclphysb.2023.11632548>

Schmidt, A. G. M., & Pereira, M. E. (2023). A quantum analog model for a scalar particle interacting with a Kerr–de Sitter black hole. *Annals of Physics*, 458, 169465. <https://doi.org/10.1016/j.aop.2023.16946558>

Siahaan, G. M. (2025). Shadows for Kerr–Sen–Taub–NUT black holes with Manko–Ruiz parameter. *Annals of Physics*, 478, 170015. <https://doi.org/10.1016/j.aop.2025.1700156>

Tavakoli, M., & Mirza, B. (2020). Generating odd-dimensional rotating black holes with equal angular momenta by using the Kerr–Schild Cartesian form of metric. *Annals of Physics*, 415, 168123. <https://doi.org/10.1016/j.aop.2020.16812367>

Zhang, M.-Y., Chen, H., Hassanabadi, H., Long, Z.-W., & Yang, H. (2024). Thermodynamic topology of Kerr–Sen black holes via Rényi statistics. *Physics Letters B*, 856, 138885. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2024.138885>