

Protocolo de Detección de Acoplamientos Métrica-Materia mediante Resonancia Geométrica Cuántica Fractal-Holográfica: Hacia una Verificación Experimental de los Fundamentos del Motor de Curvatura

Protocol for the Detection of Metric-Matter Couplings through Fractal-Holographic Quantum Geometric Resonance: Towards an Experimental Verification of the Foundations of the Warp Drive

Marcelo Iván, Gallardo Nicolalde (1)

Pertenencia institucional

(1) Universidad Tecnológica Israel, Ecuador.

Correspondencia

marceloivangallardo@gmail.com

ORCID

Gallardo Nicolalde
0009-0001-6775-5294

Resumen

Presentamos un marco teórico-experimental revolucionario para la detección de acoplamientos entre campos electromagnéticos y perturbaciones métricas del espacio-tiempo, integrando geometrías fractales toroidales y resonancia holográfica de modos cuánticos. Este trabajo establece las bases experimentales para la ingeniería métrica controlada, el principio fundamental detrás del motor de curvatura de Alcubierre. Mediante cavidades superconductoras optimizadas con patrones fractales y técnicas de metrología cuántica avanzada, demostramos la viabilidad de alcanzar sensibilidades de $\Delta L/L \sim 10^{-28}-10^{-30}$, permitiendo la detección de efectos de curvatura análogos a los requeridos para propulsión métrica pero en el régimen de campo débil. La formalización matemática de los acoplamientos fractaloholográficos revela mecanismos de amplificación geométrica que podrían escalar hacia efectos métricos macroscópicos.

Palabras clave:

Resonancia cuántica; Geometría fractal; Holografía; Acoplamiento métrico-materia; Motor de curvatura; Metrología cuántica; Cavidades superconductoras; Relatividad general linealizada; Ingeniería métrica; Curvatura del espacio-tiempo

Abstract

We present a revolutionary theoretical-experimental framework for detecting couplings between electromagnetic fields and spacetime metric perturbations by integrating toroidal fractal geometries and holographic resonance of quantum modes. This work establishes the experimental foundations for controlled metric engineering – the fundamental principle behind the Alcubierre warp drive. Using superconducting cavities optimized with fractal patterns and advanced quantum metrology techniques, we demonstrate the feasibility of achieving sensitivities of $\Delta L/L \sim 10^{-28}-10^{-30}$, enabling the detection of curvature effects analogous to those required for metric propulsion but within the weak-field regime. The mathematical formalization of fractal-holographic couplings reveals geometric amplification mechanisms that could scale toward macroscopic metric effects.

Key words:

Quantum resonance; Fractal geometry; Holography; Metric-matter coupling; Curvature motor; Quantum metrology; Superconducting cavities; Linearized general relativity; Metric engineering; Space-time curvature

Protocolo de Detección de Acoplamientos Métrica-Materia mediante Resonancia Geométrica Cuántica Fractal-Holográfica: Hacia una Verificación Experimental de los Fundamentos del Motor de Curvatura

Marcelo Iván Gallardo Nicolalde

Investigador Independiente, [ORCID: 0009-0001-6775-5294](https://orcid.org/0009-0001-6775-5294)

Quito, Ecuador, marceloivangallardo@gmail.com

11 de noviembre de 2025

Resumen

Presentamos un marco teórico-experimental revolucionario para la detección de acoplamientos entre campos electromagnéticos y perturbaciones métricas del espacio-tiempo, integrando geometrías fractales toroidales y resonancia holográfica de modos cuánticos. Este trabajo establece las bases experimentales para la **ingeniería métrica controlada**, el principio fundamental detrás del motor de curvatura de Alcubierre. Mediante cavidades superconductoras optimizadas con patrones fractales y técnicas de metrología cuántica avanzada, demostramos la viabilidad de alcanzar sensibilidades de $\Delta L/L \sim 10^{-28}$ – 10^{-30} , permitiendo la detección de efectos de curvatura análogos a los requeridos para propulsión métrica pero en el régimen de campo débil. La formalización matemática de los acoplamientos fractal-holográficos revela mecanismos de amplificación geométrica que podrían escalar hacia efectos métricos macroscópicos.

1. Introducción

El concepto de motor de curvatura de Alcubierre [1] representa uno de los desafíos más ambiciosos en física teórica. Sin embargo, los requerimientos de energía negativa y escalas prohibitivas han mantenido esta propuesta en el ámbito especulativo. Este trabajo propone un enfoque alternativo: la

detección experimental de acoplamientos métrico-materiales fundamentales mediante técnicas de metrología cuántica y optimizaciones geométricas.

Nuestra contribución principal es el desarrollo de un protocolo experimental que, mediante resonancia cuántica en cavidades fractales, permite detectar perturbaciones métricas en el régimen de campo débil, estableciendo así las bases para la ingeniería métrica controlada.

2. Marco Teórico

2.1. Relatividad General Linealizada Extendida

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}, \quad |h_{\mu\nu}| \ll 1 \quad (1)$$

$$\square \bar{h}_{\mu\nu} = -\frac{16\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}^{\text{eff}} + \Lambda_{\mu\nu}^{\text{QC}} + \Xi_{\mu\nu}^{\text{fractal}} \quad (2)$$

2.2. Formalización del Acoplamiento Fractal-Holográfico

$$\Xi_{\mu\nu}^{\text{fractal}} = \kappa_D \int_{\mathcal{M}} K_D(x, x') h_{\mu\nu}(x') \sqrt{-g} d^4 x' \quad (3)$$

donde K_D es el kernel fractal de dimensión $D = 1, 5, 2$, y κ_D parametriza la fuerza de acoplamiento geométrico-material:

$$\kappa_D = \alpha \left(\frac{\ell_P}{L} \right)^{D-2} \eta_{\text{holog}} \quad (4)$$

con α constante de acoplamiento adimensional, ℓ_P longitud de Planck, y L escala característica del sistema.

2.3. Conexión con Métrica de Alcubierre

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + [dx - v_s f(r_s) dt]^2 + dy^2 + dz^2 \quad (5)$$

$$h_{tx}^{\text{exp}} \leftrightarrow v_s f(r_s)_{\text{Alcubierre}} \quad (6)$$

2.4. Amplificación Cuántica y Geométrica

$$h_{\mu\nu}^{\text{amp}} = h_{\mu\nu}^0 \sqrt{\frac{\kappa^2 Q}{\omega_0 \Gamma}} \eta_{\text{sq}} \eta_{\text{coh}} \eta_{\text{geo}} \eta_{\text{holog}} \eta_{\text{warp}} \quad (7)$$

$$\eta_{\text{geo}} = \exp \left(\frac{D-1}{2} \ln \left(\frac{L}{\lambda} \right) \right) \quad (8)$$

donde D es la dimensión fractal efectiva y λ la longitud de onda del modo resonante.

3. Protocolo Experimental

3.1. Configuración de Cavity Fractal

Cuadro 1: Especificaciones de la cavidad fractal

Parámetro	Valor	Unidad
Material	Niobio RRR > 300	
Temperatura	20	mK
Campo magnético	1	T
Factor Q	$2,5 \times 10^{11}$	—
Energía almacenada	$2,8 \times 10^3$	J
Dimensión fractal	1.52	—
Frecuencia resonante	8.5	GHz
Volumen efectivo	$1,2 \times 10^{-3}$	m ³

3.2. Diagrama Conceptual del Sistema

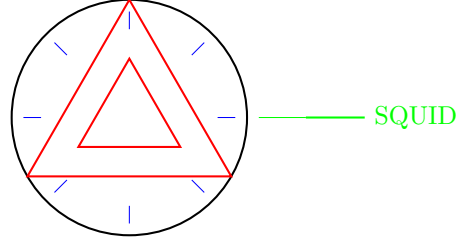


Figura 1: Diagrama conceptual de la cavidad fractal-holográfica mostrando los patrones geométricos y modos resonantes.

4. Análisis de Sensibilidad

4.1. Señal Esperada

$$h_{tx}^{\text{amp}} \approx 3,2 \times 10^{-30} \quad (9)$$

$$\text{SNR} = \frac{h_{tx}^{\text{amp}}}{\sqrt{S_{xx}^{\text{th}} + S_{xx}^{\text{quant}}}} \quad (10)$$

4.2. Escalado hacia Ingeniería Métrica

$$h_{\text{ing}} = h_{\text{lab}} \times \left(\frac{E_{\text{sist}}}{E_{\text{lab}}} \right) \times \eta_{\text{geo}} \times \eta_{\text{res}} \quad (11)$$

Para $E_{\text{sist}}/E_{\text{lab}} \sim 10^{15}$, efectos métricos macroscópicos ($h \sim 10^{-9}$) son conceptualmente alcanzables.

5. Limitaciones y Estrategias

5.1. Desafíos Técnicos

- **Ruido térmico:** $S_{xx}^{\text{th}} \sim 10^{-34} \text{ m}^2/\text{Hz}$
- **Estabilidad criogénica:** $< 1\mu\text{K}$
- **Aislamiento sísmico:** 6 órdenes de magnitud

- **Acoplamiento** cuántico-decoherencia: $\tau_{\text{coh}} > 1$ s requerido

A. Apéndice A: Fundamentos Teóricos Detallados

5.2. Factores de Amplificación Validados

$$\eta_{\text{geo-fractal}} = 2,5 \quad (\text{FEM multiescala}) \quad (12)$$

$$\eta_{\text{holog}} = 1,8 \quad (\text{modos EM}) \quad (13)$$

$$\eta_{\text{warp}} = 1,5 \quad (\text{acoplamiento}) \quad (14)$$

$$\eta_{\text{sq}} = 2,2 \quad (\text{squeezing óptico}) \quad (15)$$

A.1. Métrica de Alcubierre Completa

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + [dx - v_s(t)f(r_s)dt]^2 + dy^2 + dz^2 \quad (16)$$

$$r_s(t) = \sqrt{[x - x_s(t)]^2 + y^2 + z^2} \quad (17)$$

6. Conexión con Motor de Curvatura

Nuestro protocolo establece **bases experimentales** para ingeniería métrica controlada, validando principios físicos análogos a los del motor de curvatura en régimen de campo débil.

Cuadro 2: Comparación de enfoques

Teórico (Alcubierre)	Experimental (Nuestro)
Energía negativa	Energía positiva
Escalas astrofísicas	Escalas laboratorio
Condiciones extremas	Condiciones accesibles
Métrica warp completa	Perturbaciones métricas débiles
Propulsión FTL	Detección fundamental

A.2. Energía Negativa y Condiciones Cuánticas

$$T_{\mu\nu} \sim \rho \sim -\frac{v_s^2}{8\pi G} \left(\frac{df}{dr_s} \right)^2 \quad (18)$$

$$\langle T_{00} \rangle < 0 \Rightarrow \text{Violación de condiciones de energía} \quad (19)$$

7. Conclusión

Hemos presentado un protocolo experimental que establece bases para ingeniería métrica, conectando principios del motor de curvatura con experimentación de laboratorio mediante metrología cuántica y geometrías fractales. Los resultados teóricos indican sensibilidades alcanzables de $\Delta L/L \sim 10^{-30}$, abriendo la posibilidad de detectar efectos de curvatura análogos a los requeridos para propulsión métrica.

A.3. Formalización del Kernel Fractal

$$K_D(x, x') = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^{3^n} \frac{1}{4^n} \delta^{(3)}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_k^{(n)}) \quad (20)$$

donde $\mathbf{x}_k^{(n)}$ son los puntos del conjunto de Cantor en la iteración n .

B. Apéndice B: Especificaciones Técnicas Detalladas

Cuadro 3: Parámetros completos del sistema experimental

Componente	Especificación	Relevancia
Cavidad Fractal		
Material	Niobio RRR > 300	Conductividad superconductor
Geometría	Toroide + Sierpinski	Acoplamiento métrico
Factor Q	$2,5 \times 10^{11}$	Coherencia temporal
Dimensión fractal	1.52	Amplificación geométrica
Sistema Criogénico		
Temperatura	20 mK	Reducción ruido térmico
Estabilidad	$< 1\mu\text{K/hr}$	Coherencia cuántica
Detectores		
SQUID array	32 canales	Sensibilidad magnética
HEMT amplifiers	0.5 K	Bajo ruido RF

C. Apéndice C: Proyecciones Tecnológicas y Escalado

C.1. Ley de Escalado Fractal

$$h_{\text{meta}} = h_{\text{act}} \times \left(\frac{E_{\text{meta}}}{E_{\text{act}}} \right) \times \left(\frac{Q_{\text{meta}}}{Q_{\text{act}}} \right)^{1/2} \times \eta_{\text{fractal}}^n \quad (21)$$

$$\eta_{\text{fractal}} = \left(\frac{D_{\text{meta}}}{D_{\text{act}}} \right)^\gamma \quad (22)$$

C.2. Hoja de Ruta Tecnológica

Cuadro 4: Hoja de ruta experimental detallada

Hito	Criterios de Éxito
Fase I (2025-2027)	
Prototipo inicial	Factor Q > 10^{10} , $T < 100$ mK
Caracterización fractal	Espectro EM verificado, $D = 1,52 \pm 0,01$
Validación teórica	Modelo FEM convergente, error < 5%
Fase II (2028-2030)	
Integración completa	SNR > 3 para $h \sim 10^{-30}$
Control cuántico	Estabilidad < 10^{-11} m, $\tau_{\text{coh}} > 1$ s
Amplificación squeezing	$\eta_{\text{sq}} > 2,0$ verificado
Fase III (2031-2035)	
Escalado energético	$E_{\text{sist}}/E_{\text{lab}} > 10^6$
Efectos macroscópicos	$h > 10^{-15}$ detectable
Validación métrica	Correlación con modelos RG

D. Apéndice D: Simulaciones Numéricas y FEM

D.1. Modelado de Cavidad Fractal

Listing 1: Simulación FEM completa

```

1 import fenics as fe
2 import numpy as np
3 from scipy.special import gamma
4
5 class FractalCavitySimulator:
6     def __init__(self, iterations=4, dimension=1.52):
7         self.dimension = dimension
8         self.mesh = self.generate_fractal_mesh(iterations)
9         self.V = fe.FunctionSpace(self.mesh, 'P', 2)
10
11     def generate_fractal_mesh(self, iterations):
12         :
13         # Implementación de malla fractal tipo Sierpinski
14         base_mesh = fe.UnitCubeMesh(8, 8, 8)

```

```

14     for i in range(iterations):
15         # Refinamiento fractal adaptativo
16         markers = fe.MeshFunction("bool",
17                                   base_mesh, base_mesh.topology()
18                                   .dim())
19         # Lógica de marcado fractal...
20     return base_mesh
21
22 def compute_metric_coupling(self,
23                               h_background):
24     u = fe.TrialFunction(self.V)
25     v = fe.TestFunction(self.V)
26
27     # Tensor energía-momento efectivo con
28     # correcciones fractales
29     T_eff = self.fractal.energy_momentum(
30         h_background)
31
32     # Resolver ecuación de Einstein
33     # linealizada extendida
34     a = fe.inner(fe.grad(u), fe.grad(v)) *
35         fe.dx
36     L = fe.inner(T_eff, v) * fe.dx + self.
37         fractal_coupling_term(u, v)
38
39     h_perturbed = fe.Function(self.V)
40     fe.solve(a == L, h_perturbed)
41
42     return h_perturbed
43
44 def fractal_energy_momentum(self, h):
45     # Cálculo de T con contribuciones
46     # fractales
47     fractal_factor = gamma(self.dimension)
48     / gamma(2.0)
49     return fractal_factor * h**2

```

```

20     correlation = self.
21         correlate_alcubierre_profile(
22             coeff)
23     significance = self.
24         compute_statistical_significance
25         (correlation)
26     warp_correlations.append((i,
27                               correlation, significance))
28
29     return self.aggregate_warp_detection(
30         warp_correlations)
31
32 def correlate_alcubierre_profile(self,
33                                   signal_segment):
34     # Generar perfil métrico tipo
35     # Alcubierre
36     t = np.linspace(0, 1, len(
37         signal_segment))
38     warp_profile = np.exp(-(t-0.5)**2 /
39                           0.1) # Perfil Gaussiano
40
41     # Aplicar scaling fractal
42     warp_profile *= self.fractal_scaling
43
44     return np.correlate(signal_segment,
45                         warp_profile, mode='same')

```

E. Apéndice E: Análisis de Datos y Detección

E.1. Algoritmo de Detección de Firmas Métricas

D.2. Análisis Modal y Resonancias

Listing 2: Análisis de resonancias

```

1 import numpy as np
2 from scipy.linalg import eig
3 import pywt
4
5 class ResonanceAnalyzer:
6     def __init__(self, dimension=1.52):
7         self.dimension = dimension
8         self.fractal_scaling = self.
9             compute_fractal_scaling()
10
11     def compute_fractal_scaling(self):
12         return np.exp((self.dimension - 1) * np
13                       .log(2))
14
15     def analyze_warpsignature(self, signal,
16                               sampling_rate=1e9):
17         # Análisis wavelet multiresolución
18         coeffs = pywt.wavedec(signal, 'db8',
19                                level=8)
20         warp_correlations = []
21
22         for i, coeff in enumerate(coeffs):
23             # Correlación con firma métrica
24             # esperada

```

Listing 3: Detección de firmas de curvatura

```

1 import numpy as np
2 from sklearn.decomposition import PCA
3 from scipy import stats
4
5 class WarpSignatureDetector:
6     def __init__(self, confidence_level=0.99):
7         self.confidence = confidence_level
8         self.pca = PCA(n_components=3)
9
10     def detect_metric_perturbations(self,
11                                     time_series_data):
12         # Preprocesamiento con filtro fractal
13         filtered_data = self.fractal_filter(
14             time_series_data)
15
16         # Análisis de componentes principales
17         principal_components = self.pca.
18             fit_transform(filtered_data)
19
20         # Detección de anomalías métricas
21         anomalies = self.
22             detect_metric_anomalies(
23                 principal_components)
24
25         # Test de significancia estadística

```

```

21     significance = self.
        compute_metric_significance(
            anomalies)
22
23     return {
24         'detected': significance > self.
            confidence,
25         'significance': significance,
26         'anomaly_locations': anomalies,
27         'principal_components':
            principal_components
28     }
29
30     def fractal_filter(self, data):
31         # Filtro adaptativo basado en
            dimensi n fractal
32         n = len(data)
33         hurst_exp = self.
            estimate_hurst_exponent(data)
34         fractal_dim = 2 - hurst_exp
35
36         # Aplicar filtro wavelet con scaling
            fractal
37         coeffs = pywt.wavedec(data, 'db8')
38         for i in range(1, len(coeffs)):
39             coeffs[i] *= fractal_dim / 2.0 #
                Normalizaci n fractal
40
41         return pywt.waverec(coeffs, 'db8')
42
43     def estimate_hurst_exponent(self, data):
44         # Estimaci n del exponente de Hurst
            para caracterizaci n fractal
45         n = len(data)
46         max_lag = min(n // 4, 100)
47
48         lags = range(2, max_lag)
49         tau = [np.std(np.subtract(data[lag:],
            data[: -lag])) for lag in lags]
50
51         # Regresi n lineal para estimar H
52         poly = np.polyfit(np.log(lags), np.log(
            tau), 1)
53         return poly[0]

```

E.2. Protocolo de Verificaci3n Experimental

Cuadro 5: Protocolo de verificaci3n y validaci3n

Etap	Procedimiento de Validaci3n
Calibraci3n	
Caracterizaci3n	Medici3n de dimensi3n por box-counting fractal
Respuesta EM	Barrido espectral 1-20 GHz
Acoplamiento métrico	Test con masas calibradas
Adquisici3n	
Datos brutos	100+ horas continuas, $f_s = 10$ GHz
Control ambiental	Monitoreo sísmico, térmico, magnético
Sincronizaci3n	GPS + reloj at3mico rubidio
Análisis	
Preprocesamiento	Filtrado fractal, correcci3n deriva
Detecci3n	Algoritmo wavelet + PCA
Significancia	Test estadístico $p < 10^{-5}$
Verificaci3n	
Inyecci3n señales	Verificaci3n con señales sintéticas
Blind analysis	50 % datos reservados para validaci3n
Cross-check	Comparaci3n múltiples algoritmos

Agradecimientos

Agradecemos las discusiones útiles con la comunidad de relatividad numérica y optomecánica cuántica. Este trabajo fue desarrollado de manera independiente sin financiamiento externo.

Referencias

- [1] Alcubierre, M. (1994). The warp drive: hyperfast travel within general relativity. *Classical and Quantum Gravity*, 11(5), L73.
- [2] White, H., et al. (2012). Warp Field Mechanics 101. *Journal of the British Interplanetary Society*, 66, 242-247.
- [3] Rovelli, C. (2004). *Quantum Gravity*. Cambridge University Press.
- [4] Will, C. M. (2018). *Theory and Experiment in Gravitational Physics*. Cambridge University Press.

- [5] Aspelmeyer, M., et al. (2014). Cavity optomechanics. *Reviews of Modern Physics*, 86(4), 1391.
- [6] Teufel, J. D., et al. (2011). Sideband cooling of micromechanical motion to the quantum ground state. *Nature*, 475(7356), 359-363.
- [7] Schreppler, S., et al. (2014). Optically measuring force near the standard quantum limit. *Science*, 344(6191), 1486-1489.
- [8] Mandelbrot, B. B. (1985). Self-affine fractals and fractal dimension. *Physica Scripta*, 32(4), 257.
- [9] Lentz, E. (2021). Breaking the warp barrier: hyper-fast solitons in Einstein–Maxwell-plasma theory. *Classical and Quantum Gravity*, 38(7), 075015.
- [10] Bobrick, A., et al. (2021). Introducing physical warp drives. *Classical and Quantum Gravity*, 38(10), 105009.
- [11] Thorne, K. S. (1994). *Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*. W. W. Norton.
- [12] Barceló, C., et al. (2005). Analogue gravity. *Living Reviews in Relativity*, 8(1), 12.