



Simulación de los Parámetros de Diseño de una Antena Parabólica para la Exploración de la Línea de Hidrógeno Neutro

Duarte G. David E.¹

¹Departamento de Matemáticas, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo. Naguanagua, Edo. Carabobo-Venezuela.

¹Dirección de Informática, Universidad de Carabobo, Rectorado, Edo. Carabobo-Venezuela.

*Autor de correspondencia: deduarte1@uc.edu.ve

Recibido: 31/07/2025, Revisado: 07/08/2025, Aceptado: 15/08/2025

Resumen

Este estudio evalúa una antena parabólica para recibir la línea de emisión del hidrógeno neutro a 1420 MHz, clave en cosmología y energía oscura. Se abordaron aspectos técnicos de modelado y simulación electromagnética, considerando eficiencia, ruido, interferencias y sensibilidad. Las simulaciones ayudan a optimizar el diseño, maximizando sensibilidad y reduciendo distorsiones. Futuras investigaciones incluirán geometrías innovadoras y técnicas avanzadas para mejorar la detección del hidrógeno en entornos contaminados.

Palabras Claves: Simulación; hidrogeno neutro; antena; energia oscura; exploración

Simulation of the Design Parameters of a Parabolic Antenna for Neutral Hydrogen Line Exploration

Abstract

This study evaluates a parabolic antenna designed to receive the neutral hydrogen emission line at 1420 MHz, vital in cosmology and dark energy research. It covers technical aspects of modeling and electromagnetic simulation, considering efficiency, noise, interference, and sensitivity. Simulations help optimize the design by maximizing sensitivity and reducing distortions. Future research will explore innovative geometries and advanced techniques to improve hydrogen detection in contaminated environments.

Keywords: simulation;neutral hydrogen; antenna; dark matter; exploration.

1. Introducción

La detección de la línea de emisión del hidrógeno neutro a 1420 MHz es fundamental en la radioastronomía para estudiar la distribución y dinámica de dicho elemento en galaxias y en el universo. Antes de construir y desplegar antenas parabólicas físicas, las simulaciones computacionales permiten evaluar y optimizar sus parámetros, como la geometría, la ganancia y el patrón de radiación [1].

En este trabajo, se realizará un análisis virtual de una antena parabólica diseñada específicamente para este propósito, utilizando herramientas de modelado y simulación. La simulación ayuda a identificar aspectos críticos relacionados con la eficiencia, la sensibilidad y la reducción de ruido, permitiendo mejorar el diseño y reducir costos. La evaluación previa mediante simulaciones resulta en una mejor adaptación de la antena a los requisitos de detección de señales débil, facilitando futuras investigaciones en radioastronomía y contribuyendo al avance en la exploración del cosmos a través del estudio del hidrógeno neutro.

2. Fundamentos Teóricos

2.1 La línea de 21 cm de Hidrógeno Neutro

La línea de hidrógeno se refiere a la línea espectral de radiación electromagnética que se produce por un cambio en el estado de energía de los átomos de hidrógeno neutro. Esta radiación electromagnética se encuentra en la frecuencia aproximadamente de **1420,4 MHz**, que es equivalente a una longitud de onda de aproximadamente **21 cm**:

$$\lambda = \frac{c}{v} \quad (1)$$

donde c es la velocidad de la luz y v es la frecuencia de la radiación.

Esta longitud de onda cae dentro del rango de radio en el espectro electromagnético y es frecuentemente detectada por astrónomos que estudian el universo. Aunque el mecanismo preciso mediante el cual los átomos de hidrógeno emiten radiación con esa longitud de onda resulta ser algo complejo, no es esencial en este estudio, ya que las observaciones como tal no dependen de ella [2].

2.2 Consideraciones Teóricas sobre la Geometría de Antenas Parabólicas

La forma del patrón de radiación de una antena de apertura circular puede expresarse en términos de la intensidad del campo eléctrico, donde en la distancia de campo lejano, el patrón depende solamente de los ángulos de elevación θ y azimut ϕ , ya que la distancia es constante.

La integral de difracción de Fraunhofer que relaciona el campo radiado $F(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ y la iluminación de la apertura $f(x', y')$ es:

$$F(\phi, \theta) = \frac{1}{2\pi} \iint f(\rho, \psi) e^{ik \sin \theta (\cos \phi \cos \psi + \sin \phi \sin \psi)} \rho d\rho d\psi \quad (2)$$

Para una distribución circularmente simétrica $f(\rho)$, la expresión se reduce a:

$$F(\theta) = \int_0^\infty f(\rho) J_0(k\rho \sin \theta) \rho d\rho \quad (3)$$

Donde J_0 es la función de Bessel de orden cero. El patrón de potencia normalizada $P(\theta)$ se obtiene mediante:

$$P(\theta) = \left[\frac{2J_1(kD/2 \sin \theta)}{kD/2 \sin \theta} \right]^2 \quad (4)$$

Aquí, D es el diámetro de la apertura y $k = 2\pi/\lambda$, con λ la longitud de onda. La resolución angular, o ancho de banda a media potencia, θ_{HPBW} , se estima con:

$$\theta_{HPBW} \approx \frac{q\lambda}{D} \quad (5)$$

donde q es un factor que depende del tipo de iluminación y borde de apilamiento.

Estas formulaciones permiten evaluar y diseñar antenas de apertura circular, considerando su patrón de radiación, eficiencia y resolución angular [3].

2.2.1 Matemáticas del Paraboloide

El paraboloide es una superficie cuádruple definida por la ecuación general en coordenadas Cartesianas:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 2cz \quad (6)$$

donde a, b, c son constantes reales. En caso particular de un paraboloide circular, se toma $a = b$, simplificando la expresión a:

$$\frac{x^2 + y^2}{a^2} = 2cz \quad (7)$$

Trazas del paraboloide

Las trazas principales en los planos coordinados son:

- En el plano xy ($z=0$):

$$x^2/a^2 + y^2/b^2 = R \quad (8)$$

- En el plano xz ($y=0$):

$$z = \frac{x^2}{2ca^2} \quad (9)$$

- En el plano yz ($x=0$):

$$z = \frac{y^2}{2cb^2} \quad (10)$$

Estas trazas corresponden a parábolas en los planos xz y yz .

Condición de forma del paraboloide

El perfil del paraboloide se obtiene imponiendo que el frente de onda en la apertura sea de fase uniforme, lo cual deriva en una condición que relaciona su parámetro geométrico con el foco. La distancia r desde un punto en la superficie hasta el foco $F = (f, 0, 0)$ sigue la relación:

$$r^2 = (x - f)^2 + y^2 + z^2 \quad (11) \quad [4]$$

Para que toda la superficie refleje ondas en fase, debe satisfacerse la condición de que todos los puntos de la superficie tengan la misma distancia focal f , resultando en la ecuación del paraboloide en coordenadas locales:

$$z = \frac{x^2 + y^2}{4f} \quad (12)$$

De esta forma, el perfil del reflector en coordenadas cartesianas corresponde a un paraboloide de revolución definido por:

$$z = \frac{\rho^2}{4f} \quad (13)$$

donde $\rho^2 = x^2 + y^2$.

Relación entre foco y diámetro de apertura

La relación entre la distancia focal f y el diámetro de apertura D_a puede expresarse mediante:

$$f = \frac{D_a^2}{16c} \quad (14)$$

así, si se desea controlar la calidad del enfoque, la relación f/D_a determina parámetros de directividad y eficiencia del reflector.

Ecuaciones vectoriales y ley de reflexión

Para una reflexión en la superficie $z = \frac{\rho^2}{4f}$, el vector normal \mathbf{n} en un punto (x, y, z) se obtiene como:

$$\mathbf{n} = \nabla \left(z - \frac{x^2 + y^2}{4f} \right) = \left(-\frac{x}{2f}, -\frac{y}{2f}, 1 \right) \quad (15)$$

El vector incidente \mathbf{I} y reflejado \mathbf{R} deben cumplir la ley de reflexión:

$$\mathbf{R} = \mathbf{I} - 2(\mathbf{I} \cdot \mathbf{n})\mathbf{n} \quad (16)$$

2.2.2 Caso: Paraboloide Elíptico

Cuando se trata de antenas cuya sección es un Paraboloide Elíptico, entonces debemos considerar que se trata de una superficie cuyas ecuaciones generales, sin rotación ni traslación, se expresa como:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 2cz \quad (17)$$

donde a, b, c son constantes que determinan su tamaño y forma.

Trazas del paraboloide elíptico:

- En el plano xy ($z=0$):

$$x^2/a^2 + y^2/b^2 = 0 \quad (18)$$

que corresponde únicamente al punto $(0, 0, 0)$.

- En el plano xz ($y=0$):

$$z = \frac{x^2}{2a^2c} \quad (19)$$

que es una parábola en la dirección x .

- En el plano yz ($x=0$):

$$z = \frac{y^2}{2b^2c} \quad (20)$$

otra parábola, en la dirección y .

Estas ecuaciones y sus trazas permiten diseñar y analizar el comportamiento de las antenas parabólicas elípticas, optimizando su enfoque y eficiencia para aplicaciones de comunicación y radiodifusión [5].

2.3 Criterios de Diseño de Antenas Parabólicas en Radioastronomía

Fundamentos geométricos y matemáticos del diseño y funcionamiento de las antenas parabólicas, incluyendo conceptos de ganancia, patrón de radiación, eficiencia y directividad. Se explica la relación entre diámetro, frecuencia y ganancia.

2.3.1 Ganancia

La antena parabólica se caracteriza por su alta ganancia, lo cual es esencial para detectar señales débiles. La ganancia G de una antena parabólica varía aproximadamente con el diámetro D según la relación:

$$G \approx \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \quad (21)$$

donde η es la eficiencia de la antena y λ la longitud de onda. La precisión en el diseño y la elección de materiales son fundamentales para reducir pérdidas y maximizar la sensibilidad [6].

2.3.2 Sensibilidad

La sensibilidad de una antena parabólica es una medida importante que determina su capacidad para detectar señales extremadamente débiles provenientes de fuentes astronómicas. Esta sensibilidad depende fundamentalmente de la relación entre la superficie efectiva de la antena y la temperatura de ruido del sistema, que incluye tanto las pérdidas atmosféricas como las internas. Un aumento en la superficie efectiva, junto con la reducción de la temperatura de ruido, permite mejorar significativamente la capacidad de captar señales débiles, facilitando observaciones más precisas en radioastronomía [7].

La sensibilidad se relaciona directamente con la relación señal-ruido (SNR), donde una mayor sensibilidad implica una menor presencia de ruido comparado con la señal recibida. La temperatura de ruido del sistema, T_{sys} , combina las contribuciones del ambiente, los componentes electrónicos y la superficie reflectora, y es importante minimizarla para mejorar la detección. La relación de la sensibilidad puede expresarse mediante la ecuación:

$$\text{Sensibilidad} \propto \frac{A_{eff}}{T_{sys}} \quad (22)$$

donde A_{eff} es la superficie efectiva de la antena. Un aumento de A_{eff} o una reducción en T_{sys} incrementa la sensibilidad total, permitiendo detectar señales más débiles con mayor precisión.

Por tanto, un diseño óptimo busca maximizar la eficiencia de captura de la energía, que se evalúa mediante el coeficiente de eficiencia η , definido como la relación entre la potencia recogida efectivamente por la superficie reflector y la potencia teórica ideal basada en su área geométrica. La eficiencia incluye pérdidas en la superficie, en los alimentadores y en los materiales, siendo:

$$\eta = \frac{A_{recogida}}{A_{geometrica}} \quad (23)$$

Un alto coeficiente de eficiencia garantiza que la mayor parte de la energía incidente contribuya a la señal útil, crucial para detectar señales débiles con claridad [8].

2.3.3 Eficiencia

La eficiencia de las antenas parabólicas representa un parámetro que refleja la calidad de su desempeño y normalmente se fija en aproximadamente 60 %. Sin embargo, distintos aspectos como la eficiencia de apertura, el desbordamiento o spillover, la eficiencia en iluminación, la eficiencia óhmica, la eficiencia de polarización cruzada y la eficiencia de bloqueo, contribuyen en conjunto a definir el rendimiento global de la antena. La fórmula general que relaciona estas eficiencias es:

$$\eta = \eta_a \eta_s \eta_i \eta_R \eta_p \eta_b \quad (24)$$

Donde cada término representa:

- η_a : eficiencia de apertura
- η_s : eficiencia por desbordamiento o spillover
- η_i : eficiencia en iluminación
- η_R : eficiencia óhmica
- η_p : eficiencia de polarización cruzada
- η_b : eficiencia de bloqueo

[9]

2.4 Aplicaciones y Estudios Precedentes

El estudio titulado: **Simulation of Small Radio Telescope Antenna Parameters at Frequency of 1.42 GHz** analiza las propiedades geométricas y electromagnéticas de paraboloides en antenas de apertura. Resalta que mejorar la precisión del perfil y optimizar la geometría aumenta la sensibilidad y reduce pérdidas, facilitando la detección de señales débiles en radioastronomía. [3].

El artículo llamado **Small Radio Telescope for Observing the Neutral Hydrogen Line of the Milky Way** revisa requisitos de diseño de antenas en radioastronomía, destacando la importancia del tamaño y T_{sys} para mejorar sensibilidad y detectar señales débiles. Propone algoritmos para optimizar la geometría y materiales, elevando la eficiencia y reduciendo pérdidas en observaciones astronómicas. [10].

El estudio **Antena doble Biquad con reflector parabólico para la banda de 2.4 GHz** destaca que la precisión en la geometría del paraboloid mejora la sensibilidad y reduce pérdidas en antenas radioastronómicas. Propone un modelo matemático para optimizar superficies reflector, aumentando la eficiencia y capacidad de detección de señales débiles en sistemas grandes [11].

3. Métodos Aplicados

Para evaluar los parámetros geométricos y electromagnéticos de la antena parabólica de 6 metros de diámetro, se realizó una simulación computacional utilizando el software de código abierto GNU/Octave. La simulación tuvo como objetivo estimar la ganancia, sensibilidad y eficiencia de la antena al ser reutilizada para captar la línea de emisión del hidrógeno neutro a 1420 MHz.

La metodología comprendió los siguientes pasos:

- **Definición de parámetros físicos y de diseño:**
Se establecieron las constantes físicas relevantes, incluida la velocidad de la luz ($c = 3 \times 10^8$ m/s) y el valor de la frecuencia de interés ($f = 1,420 \times 10^9$ Hz). A partir de estos, se calculó la longitud de onda ($\lambda \approx 0,211$ m).
- **Configuración de geometría y materiales:**
Se seleccionó una geometría circular para la

parabólica, con diámetro $D = 6$ m. Se consideraron factores de eficiencia y obstáculos, con valores predeterminados del 70 % de eficiencia ($efficiency = 0,7$) y un factor de reducción por obstáculos de 0.9. Otros parámetros de diseño, como la polarización y la elevación, también fueron definidos.

- **Cálculo de la geometría y área efectiva:** Se determinaron el radio y la superficie de la parabólica (A_{geom}) y, considerando la eficiencia y obstáculos, se obtuvo el área efectiva (A_{eff}).
- **Estimación de la ganancia:** Con base en la área efectiva, se calculó la ganancia teórica utilizando la fórmula

$$G = \frac{4\pi A_{eff}}{\lambda^2}, \quad (25)$$

expresada en decibelios (dB) mediante $G_{dB} = 10\log_{10} G$.

- **Ancho de haz:** Se aproximó el ancho de haz (HPBW) mediante la relación

$$\theta_{HPBW} \approx 70 \times \frac{\lambda}{D} \quad (26)$$

en grados, para evaluar la directividad.

- **Cálculo de la sensibilidad:** Utilizando la temperatura del sistema ($T_{sys} = 50$ K) y la constante de Boltzmann ($k_B = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K), se estimó la densidad equivalente de flujo del sistema (SEFD) y, posteriormente, el flujo mínimo detectable (S_{min}) en unidades de Jy, considerando una banda de ancho de ~ 1 MHz.
- **Análisis del patrón de radiación:** Se generó un patrón de radiación simplificado en el régimen de Fraunhofer, normalizado y expresado en dB, para visualizar la distribución angular de la potencia.

Todos los cálculos y resultados fueron almacenados en un archivo .m para su posterior análisis. La simulación permitió evaluar la capacidad de la antena para detectar señales débiles a la frecuencia de interés, contribuyendo a la evaluación de futuras mejoras en su diseño y eficiencia.

4. Resultados

Los resultados de la simulación para la antena parabólica de 6 metros de diámetro, reutilizada para captar señales a 1420 MHz, se muestran a continuación. La ganancia estimada fue de 37.00 dB, indicando una alta directividad y capacidad de concentración de la señal. El ancho de haz (HPBW) calculado fue de 2.46 grados, lo que refleja un patrón de radiación bastante estrecho, adecuado para la observación de señales débiles en radioastronomía.

La sensibilidad mínima de detección (S_{min}) se evaluó en aproximadamente $2,81 \times 10^{-3}$ Jy, demostrando la capacidad de detectar señales muy débiles en las condiciones simuladas. Otros parámetros relevantes incluyen:

- Frecuencia: 1.42 GHz
- Longitud de onda: 0.211 m
- Geometría: circular
- Diámetro/Eje mayor: 6.00 m
- Área efectiva: 17.81 m²
- Polarización: lineal
- Elevación: 45.00°
- Factor de obstáculos: 0.90
- Ancho de banda: 1.00 MHz
- Temperatura de sistema (ruido): 50.00 K

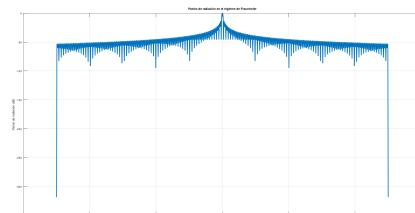


Figura 1. Patrón de radiación simulado de la antena parabólica en el régimen de Fraunhofer. La gráfica muestra la distribución angular de la potencia en dB.

Estos resultados indican que la antena, en su configuración simulada, presenta una buena ganancia (37 dB) lo cual es adecuada para la señal de Hidrógeno Neutro, al igual que un alto rendimiento para la detección de señales débiles relacionadas con la línea de emisión a 1420 MHz, lo que valida la viabilidad

de su reutilización en futuras aplicaciones en radioastronomía.

En este artículo se presenta un estudio exhaustivo sobre la simulación y evaluación de una antena parabólica específicamente diseñada para la recepción de la línea de emisión del hidrógeno neutro en la banda de 1420 MHz, conocida como la línea de 21 cm, que es fundamental en la investigación de la estructura a gran escala del universo y en la comprensión de fenómenos relacionados con la energía oscura y la expansión cósmica. Se abordarán los aspectos técnicos y metodológicos del modelado de la antena, destacando aspectos clave como su geometría, ganancia, patrón de radiación y efectividad de captación, utilizando avanzadas herramientas de simulación electromagnética. Además, se realizará un análisis detallado de factores como la eficiencia de la antena, el nivel de ruido térmico, la reducción de interferencias externas y la sensibilidad ante señales débiles, elementos necesarios para la detección precisa de señales de hidrógeno en entornos con alto nivel de contaminación electromagnética.

El objetivo principal de este estudio fue demostrar cómo las evaluaciones virtuales y simulaciones computacionales contribuyen a la optimización del diseño, permitiendo identificar configuraciones que maximicen la sensibilidad y minimicen las distorsiones antes de la construcción física del prototipo.

Las siguientes son recomendaciones específicas para futuras investigaciones, incluyendo configuraciones de geometrías innovadoras, y técnicas avanzadas de filtrado y procesamiento de señales, que incrementarían aún más la eficacia y precisión de las antenas parabólicas en estudios cosmológicos. La integración de estos avances tecnológicos potenciará los esfuerzos en la exploración del hidrógeno neutro, un componente clave en la comprensión de los fenómenos energéticos y estructurales del universo en el contexto de la cosmología moderna y la energía oscura.

5. Recomendaciones a Futuro

Teniendo en cuenta que en la realidad existen dos antenas de iguales características ubicadas en puntos geográficamente distantes, pertenecientes a los activos de la Universidad de Carabobo, se recomienda explorar la implementación de sistemas de interfero-

metría para mejorar la sensibilidad y resolución del conjunto de observación. La utilización de una red de antenas, mediante técnicas de interferometría, permitiría obtener imágenes de mayor resolución angular y ampliar el campo de visión, facilitando la detección de señales débiles provenientes de regiones distantes del universo.

Las imágenes muestran las condiciones en las que se encuentran las antenas mencionadas:



Figura 2. Antena ubicada en el Centro Comercial Prebo, coordenadas: 10.2079659,-68.0224749



Figura 3. Antena ubicada en el Centro Escorpio, coordenadas: 10.2083135,-68.0158307

Asimismo, futuras investigaciones deberían centrarse en el diseño y simulación de configuraciones de múltiples antenas interconectadas, considerando aspectos como la calibración, sincronización y procesamiento de datos en tiempo real. La simulación de esquemas de interferometría, combinada con análisis de sensibilidad y eficiencia, permitirá evaluar en qué condiciones la rentabilidad de un sistema de este tipo supera la inversión necesaria, optimizando así los recursos disponibles, con fines investigativos y académicos.

Además, sería recomendable realizar experimentos de validación con prototipos físicos, para contrastar los resultados de las simulaciones y ajustar los modelos teóricos, asegurando que las configuraciones propuestas sean viables técnica y económicamente. La colaboración con instituciones y centros de investigación especializados en radioastronomía sería fundamental para avanzar en la implementación práctica de estos sistemas, ampliando las capacidades de las futuras instalaciones para la exploración del hidrógeno neutro y otros fenómenos cosmológicos de interés.

Este enfoque colaborativo, adelantado desde las eta-

pas de simulación, potenciaría significativamente las capacidades de detección y análisis, contribuyendo a profundizar en nuestro entendimiento del universo, en línea con las estrategias internacionales en cosmología y energía oscura.

Referencias

- [1] J. Rodríguez Pérez *et al.*, “Construcción de un pequeño radiotelescopio para la detección de la línea del hidrógeno neutro,” 2024.
- [2] A. Spanakis-Misirlis, “Building your very first radio telescope,” 2019. Greece.
- [3] U. E. Jallod, H. S. Mahdi, and K. M. Abood, “Simulation of small radio telescope antenna parameters at frequency of 1.42 ghz,” *Iraqi Journal of Physics*, vol. 20, no. 1, pp. 37–47, 2022.
- [4] J. Anguera and A. Perez, “Teoría de antenas. guía de estudio,” *La Salle Universidad Ramon LLull España: Creative Commons License Deed*, 2008.
- [5] J. d. J. Muentes Acevedo, *Un curso de Cálculo Vectorial*. Universidad Tecnológica de Bolívar, 2023.
- [6] J. M. Román Beltrán, “Implementación de un prototipo de antena receptora de televisión satelital, utilizando arreglos de antenas parabólicas tipo offset para el incremento de ganancia,” B.S. thesis, Quito, 2016., 2016.
- [7] A. Raghunathan, K. Satish, A. Sathyamurthy, T. Prabu, B. Girish, K. Srivani, and S. K. Sethi, “Antennas for low-frequency radio telescope of ska,” *Journal of Astrophysics and Astronomy*, vol. 44, no. 1, p. 43, 2023.
- [8] J. Cumner, E. de Lera Acedo, D. I. de Villiers, D. Anstey, C. I. Kolitsidas, B. Gurdon, N. Fagnoni, P. Alexander, G. Bernardi, H. T. Bevins, *et al.*, “Radio antenna design for sky-averaged 21 cm cosmology experiments: The reach case,” *Journal of Astronomical Instrumentation*, vol. 11, no. 01, p. 2250001, 2022.
- [9] K. Neto, “Estudio de un prototipo de antena parabólica que funcione en banda C de microondas para la recepción de comunicaciones satelitales,” 2008.

- [10] A. Reckziegel, D. Stalder, and J. Molina, “Small radio telescope for observing the neutral hydrogen line of the milky way,” 2022.
- [11] D. R. Jiménez, D. B. Casanova, and T. C. Rodríguez, “Antena doble biquad con reflector parabólico para la banda de 2.4 ghz,” *Mare Ingenii*, vol. 4, no. 2, 2022.