 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Diseño de un esquema para la adquisición y procesamiento de señales radioastronómicas en la banda 1420 MHz

Johan Javier Urrego Urrego

Robinson Alesxander Hincapié Cano

Ingeniería en telecomunicaciones

Asesor:

David Andrés Márquez Viloría

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

Junio 03 del 2015

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Resumen

Los cuerpos celestes se han dado a conocer gracias a la luz que por diferentes fenómenos físicos o químicos estos emiten, pero esta es solo una de las muchas formas que existen de energía electromagnética y que al sumarlas forman esa inmensa autopista de información llamada “Espectro Electromagnético” . Por ello, si solo se estudiase la parte visual del espectro desconoceríamos una gran cantidad de fenómenos, los cuales han contribuido al desarrollo tecnológico del hombre moderno.

Estos cuerpos emiten radiación en diferentes regiones del espectro electromagnético aunque con muy poca intensidad ya que la concentración de energía disminuye muy rápidamente a medida que nos alejamos de una fuente de radiación electromagnética. Por consiguiente, los astrónomos deben diseñar nuevos tipos de instrumentos para captar estos datos, entre ellos, los radiotelescopios que como su nombre lo indica localizan ondas de radio.

La radioastronomía investiga el universo con antenas y sofisticados dispositivos de radio, con los cuales se ha ampliado la comprensión humana del cosmos, permitiendo ir más allá de lo que ha podido ir el ojo humano.

En el presente trabajo se propone el diseño de un sistema de adquisición para la recolección de información del hidrógeno en la banda de 1420 MHz, este desarrollo consta de una antena bocina circular alimentado con una sonda (antena monopolo) y un plato parabólico de 5m de diámetro. Para el procesamiento de señales se utilizó un nuevo concepto que está revolucionando las comunicaciones inalámbricas: “Radio Definida por Software” (SDR, Software Defined Radio), apoyándonos en el GNU radio para todo el procesamiento de las señales.

Palabras clave: Antena, Espectro Electromagnético, radioastronomía, universo.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Abstract

The celestial bodies have been known thanks to the light by different physical or chemical phenomena they emit but this is only one of many forms of electromagnetic energy that exist and that add them they form the great superhighway of information called "Electromagnetic Spectrum". Therefore, if only we studied the visual part of the spectrum we would not know a lot of phenomena which have contributed to the technological development of modern man.

These bodies emit radiation in different regions of the electromagnetic spectrum although with little intensity and the concentration of energy decreases very rapidly as we move away from a source of electromagnetic radiation. Therefore, astronomers must design new types of instruments to capture this information including radio telescopes, which as its name suggests located radio waves.

Radio astronomy investigates the universe with antennas and sophisticated radio devices, with which have expanded human understanding of the cosmos, allowing go beyond what fetch the human eye.

This work exposes the design of an acquisition system in order to collect information regarding hydrogen in the 1420 MHz band; this design incorporates a horn circular antenna, which is supply with a probe (monopole antenna) and a parabolic plate with a diameter of 5m. To the signal processing a new revolutionary concept for wireless communication named: "software defined Radio" was used, using the software GNU radio to do the whole signal processing.

Keywords: Antenna, Electromagnetic spectrum, radio astronomy, universe

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Reconocimientos

El presente trabajo fue realizado bajo la supervisión del señor Guillermo Gancio del Instituto Argentino de Radioastronomía IAR a quién me gustaría expresar mi más profundo agradecimiento, por hacer posible la realización de este estudio.

Después de “culminar” esta etapa en mi vida, la cual representó múltiples desafíos, incertidumbres, enojos y aprendizajes, quiero manifestar mi agradecimiento a las personas que con su acompañamiento, colaboración y voz de aliento, permitieron vivir esta experiencia.

A mis padres Jaime y Liliana, a mi abuela Rocío Cano pilares fundamentales en mi vida.

A mi esposa Tatiana quién representó gran esfuerzo y apoyo en todo momento durante la culminación de mis estudios.

A mis hijas Nicole Samantha, Kerlyn Dayana y María Fernanda quienes han sido la fuente de mi inspiración y han llegado para iluminar y alentar mi vida.

A mis hermanos y amigos que me apoyaron y alentaron para no desfallecer en el intento.

A DIOS.....

ROBINSON ALESXANDER HINCAPIÉ CANO

Agradezco a todas las personas que en forma directa o indirecta aportaron con sus conocimientos para que este trabajo de investigación y diseño se desarrollara. Por último un agradecimiento profundo a mis padres, Rosa María Urrego y Rodrigo Urrego por su constante apoyo, motivación y paciencia que siempre manifestaron.

JOHAN JAVIER URREGO URREGO

En memoria de WILDER ALEJANDRO URREGO URREGO siempre te vamos a recordar como hijo, hermano y amigo.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Lista de Símbolos

RTI	Reglamento de telecomunicaciones internacionales
MHz	Megahercios
HI	Hidrógeno Neutro
IAR	Instituto Argentino de radioastronomía
DSP	Digital Signal Processing
f	Frecuencia
λ	Longitud de onda
T	Periodo
c	velocidad de la luz
\vec{B}	Densidad de flujo magnético
\vec{H}	Intensidad de campo magnético
\vec{E}	Campo eléctrico
\vec{J}	Densidad de corriente
I	Corriente
\vec{A}	Vector potencial magnético
$\vec{\nabla}$	operador rotacional
\vec{E}^r	compa eléctrico radiado
P_{sal}	Potencia de salida
\hbar	Constante de Planck
w	potencia incidente
Ω	ángulo solido
Ω_M	ángulo solido del haz principal
Ω_m	ángulo solido de los lóbulos menores
ε_M	eficiencia del haz
λ_c	longitud de onda de corte se por (TE11)
$D_{b\ min}$	diámetro mínimo de la guía de onda
k_g	número de onda que se propaga en la guía
k	número de onda de la señal de trabajo
k_c	número de onda de la señal de corte
c_p	Profundidad del plato
θ_0	Grado de inclinación
A_{tol}	Área total del reflector parabólico
A_{efc}	Área efectiva del reflector parabólico
G	Máxima ganancia del reflector parabólico
τ	Atenuación de los campos
η_{il}	Eficiencia de iluminación

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

η_s	Eficiencia de desbordamiento
η_b	Eficiencia por bloqueo
η_t	Eficiencia total
D_p	Diámetro del plato parabólico
f	Distancia focal del plato parabólico

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Tabla de contenido

Capítulo 1.....	16
Introducción	16
1.1 Motivación	17
1.2 Planteamiento del problema y preguntas de investigación	19
1.3 Objetivos del trabajo de grado.....	20
1.4 Metodología propuesta.....	20
1.4.1 Plan de trabajo	21
Capítulo 2.....	24
Inicio de la radio astronomía, radio telescopio superheterodino.....	24
2.1 Historia del inicio de la radio astronomía	24
2.2 Historia línea 21 cm.....	26
2.2.1 Importancia de la Línea 21 Cm.....	27
2.2.2 La línea de 21 cm del HI.....	28
2.2.3 Espectros atómicos	29
2.3 Descubrimiento del polvo interestelar	30
2.4 Descubrimiento del gas interestelar	30
2.5 El gas atómico de la Galaxia	30
2.6 Esquema de un Receptor Superheterodino	31
2.6.1 Antena	32
2.6.2 Guía de onda	32
2.6.3 Amplificador de RF (LNA)	33
2.6.4 Mezclador y oscilador local	33
2.6.5 Amplificador de frecuencia intermedia y filtro pasa bandas	34
2.6.6 Detector de la ley cuadrática	34
2.6.7 Integrador.....	34
Capítulo 3.....	36
Ondas electromagnéticas, características fundamentales de las señales y espectro electromagnético.....	36
3.1 Ondas electromagnéticas.....	36

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.2	Ecuaciones de Maxwell	36
3.2.1	Deducción de la ecuación de onda partiendo de las leyes del electromagnetismo	38
3.3	Radiación de campo lejano	40
3.4	Polarización	43
3.5	Vector de Pointing y flujo de potencia.....	44
3.6	Amplitud.....	45
3.7	Periodo	45
3.8	Frecuencia	46
3.9	Longitud de onda (λ)	46
3.10	Espectro electromagnético	46
3.10.1	Luz visible	47
3.10.2	Rayos infrarrojos	48
3.10.3	Microondas.....	48
3.10.4	Ondas de radio	49
3.10.5	Rayos x.....	50
3.10.6	Radiación ultravioleta	50
3.10.7	Rayos gamma	50
Capítulo 4.....		52
Radiación de fuentes cósmicas y técnicas modernas de captura de señales radioeléctricas		52
4.1	Radiación térmica.....	52
4.1.1	Propiedades de la Radiación térmica.....	53
4.2	Radiación de cuerpo negro	54
4.3	Radiación sincrotrón	56
4.4	Interferometría.....	57
4.4.1	Interferencia constructiva	58
4.4.2	Interferencia destructiva.....	60
Capítulo 5.....		61
Diseño de esquema para la adquisición de señal en la frecuencia de 1420MHz (hidrógeno neutro).....		61
5.1	Radiación electromagnética proveniente del espacio	61

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5.2	Ángulo solido.....	62
5.2.1	Ángulo solido del haz principal.....	62
5.3	Antena receptora (bocina cilíndrica).....	62
5.3.1	Alimentación del receptor.....	63
5.3.2	Diseño de alimentación utilizando un monopolo de $\lambda/4$	64
5.3.3	Diseño de bocina circular con alimentación de guía de onda.....	72
5.3.4	Diseño de antena primaria guía de onda con alimentación de monopolo	77
5.4	Análisis geométrico del plato paraboloide para la antena receptora.....	88
5.4.1	Diámetro del receptor parabólico (Dp).....	88
5.4.2	Distancia focal del receptor parabólico (f)	88
5.4.3	Profundidad del receptor parabólico (c)	89
5.4.4	Grado de inclinación (θ_0)	89
5.4.5	Área de un reflector parabólico (A).....	89
5.4.6	Máxima ganancia de un reflector parabólico (G).....	90
5.5	Análisis partiendo del concepto de óptica geométrica.....	90
5.5.2	Ley de Snell.....	91
5.6	Análisis de reflector mediante óptica física	92
5.7	Análisis de reflector mediante apertura	94
5.7.1	Directividad del reflector parabólico.....	97
5.7.2	Eficiencia de iluminación.....	97
5.7.3	Eficiencia de desbordamiento.....	98
5.7.4	Eficiencia por bloqueo.....	98
5.7.5	Eficiencia de polarización	99
5.7.6	Eficiencia total	99
5.8	Diseño final de un esquema para la adquisición y procesamiento de señales radioastronómicas en la banda 1420 MHz.....	100
5.8.1	Simulación de reflector con antena bocina circulara.....	101
5.8.2	Simulación de reflector con antena bocina circulara y anillo de bloqueo	103
Capítulo 6.....		107
Procesamiento de señales mediante GNU Radio.....		107
6.1	Sistema de adquisición de señales.....	107

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

6.2	Procesamiento Digital de Señales (DSP)	108
6.2.1	¿Qué es Procesamiento Digital de Señales?	108
6.2.2	Señales.....	108
6.2.3	Sistemas.....	109
6.3	Historia DSP.....	109
6.3.1	Ventajas del procesamiento digital.....	111
6.4	Modelos Matemáticos y Algoritmos para Procesamiento de Señales	113
6.5.2	Separación Ciega de Fuentes (Blind Source Separation BSS).....	118
6.5.3	Descomposiciones Tensoriales.....	119
6.5.4	Censado Comprimido Multidimensional.....	120
6.6	Radio definido por software (SDR).....	121
6.6.1	¿Qué es Radio Definido por Software?	121
6.6.2	Objetivo Tecnológico del SDR	122
6.7	Análisis y diseño del sistema de procesamiento de señales.....	122
6.7.1	Hardware: Receptor	124
6.7.2	RTLSDR.....	125
6.7.3	RTL-SDR Blog marca R820T2 RTL2832U Dongle.....	125
6.7.4	Hardware: Un ordenador PC.....	126
6.8	Sistema Operativo utilizado: Ubuntu 14.04	126
6.8.1	¿Qué significa que sea libre?.....	127
6.9	Software: Gnu Radio: La Infraestructura del Procesamiento de Señales	127
6.9.1	Aplicación simple_ra	128
6.9.2	Requisitos Del Sistema	129
6.9.3	Instalación	129
6.9.4	El comando simple_ra.....	130
6.8	La ventana del detector	141
6.8.1	Autorange.....	142
6.9	La ventana espectral	143
6.10	Panel de control de la pantalla espectral.....	145
6.11	Implementación por gráficos de flujo utilizando GNU Radio companion	146
6.12	Observación a partir de los Datos del receptor digital HI(IAR)	147

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

6.13	Resultados	155
7.	Conclusiones.....	157
8.	Trabajos futuros	159
	Bibliografía.....	160
	Anexos	164
	Anexo A: Código antena monopolo	164
	Anexo B: Código antena bocina circular	166
	Anexo C: Código antena bocina circular más monopolo	169
	Anexo D: Código Reflector con antena bocina circular.....	172
	Anexo E: Código Reflector con antena bocina circular y anillo de bloqueo	174
	Anexo F: Script de instalación gr-tools para Simple-Ra.....	177
	Anexo G: Base de datos: RAW.....	181
	Anexo H: Carta de colaboración Instituto Argentino de Radioastronomía	184

Lista de Imágenes

<i>Imagen 1. Distribución de las regiones H I en la Vía Láctea.</i>	28
Imagen 2. Transición hiperfina del átomo del Hidrógeno.	29
<i>Imagen 3. Líneas atómicas de emisión de hidrógeno en la región visible del espectro. (Dill, 2005).</i>	29
Imagen 4. Esquema de un receptor superheterodino	32
Imagen 5. Espectro Electromagnético.	47
Imagen 6. Emisiones de radiación sincrotrón. (Laboratorio de Astrofísica Espacial y Física Fundamental. LAEFF, 2015).....	56
Imagen 7. Formación de línea de 21cm de hidrogeno neutro. (Laboratorio de Astrofísica Espacial y Física Fundamental. LAEFF, 2015).....	57
Imagen 8. Interferencia constructiva.	60
Imagen 9. Interferencia destructiva.	60
Imagen 10. Monopolo de $\lambda/4$ para la frecuencia 1420MHz.	65
Imagen 11. Patrón de radiación tridimensional del monopolo.	66
Imagen 12. Corte trasversal del patrón de radiación del monopolo.	67
Imagen 13. Patrón de radiación en coordenadas polares del monopolo.	67
Imagen 14. Patrón de radiación en coordenadas polares del monopolo.	68
Imagen 15. Parámetro VSWR.	69
Imagen 16. Coeficiente de reflexión.	69
Imagen 17. Parámetro S11.	70
Imagen 18. Relación axial.....	71
Imagen 19. Relación axial descomposición de polarización.	71
Imagen 20. Entena bocina circular para la frecuencia 1420MHz.....	73
Imagen 21. Patrón de radiación en 3D de antena bocina circular para la frecuencia 1420MHz.....	73
Imagen 22. Corte trasversal del patrón de radiación de antena bocina circular para la frecuencia 1420MHz.	74
Imagen 23. Patrón de radiación en coordenadas polares de antena bocina circular para la frecuencia 1420MHz.	75
Imagen 24. Patrón de radiación en coordenadas cartesianas de antena bocina circular para la frecuencia 1420MHz.	75
Imagen 25. Relación axial par antena bocina circular en la frecuencia 1420MHz.	76
Imagen 26. Relación axial descompuesta en polarización elíptica de la antena bocina circular.....	77
Imagen 27. Receptor primario para radio telescopio con frecuencia de operación en 1420MHz. .	80
Imagen 28. Patrón de radiación en 3D de la antena del receptor.	81
Imagen 29. Corte del plano phi del patrón de radiación en 3D de la antena del receptor.....	81
Imagen 30. Patrón de radiación en coordenadas polares de antena receptora.....	82
Imagen 31. Patrón de radiación en coordenadas cartesianas de antena receptora.	83

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Imagen 32. Parámetro VSWR antena receptora.	84
Imagen 33. Coeficiente de reflexión antena receptora.	85
Imagen 34. Parámetro S11.	86
Imagen 35. Relación axial para antena receptora.	87
Imagen 36. Relación axial descompuesta en polarización circular para antena receptora.	88
Imagen 37. Ley de intensidad de la óptica geométrica. (Ramón Angosto Sánchez, 2015).	91
Imagen 38. Reflexión y refracción (Ramón Angosto Sánchez, 2015).	91
Imagen 39. Ley de Snell (Magdalena. Avilés, 2015).	92
Imagen 40. Plato reflector parabólico.	94
Imagen 41. Simulación de reflector con antena bocina en 1420MHz.	101
Imagen 42. Patrón de radiación en coordenadas polares de reflector.	102
Imagen 43. Patrón de radiación en coordenadas cartesianas de reflector.	102
Imagen 44. Simulación de reflector con antena bocina y anillo de bloqueo para la frecuencia de operación de 1420MHz.	103
Imagen 45. Patrón de radiación en coordenadas polares de reflector con antena bocina y anillo de bloqueo.	104
Imagen 46. Patrón de radiación en coordenadas cartesianas de reflector con antena bocina y anillo de bloqueo.	104
Imagen 47. Esquema de adquisición de señales de radioastronomía en 1420MHz.	106
Imagen 48. RTL-SDR Blog marca R820T2 RTL2832U Dongle (http://www.amazon.com/RTL-SDR-Blog-RTL2832U-Software-Telescopic/dp/B00QFCNNV0)	107
Imagen 49. Degradación de un pulso binario. (Sklar Bernard, 2001)	112
Imagen 50. Ventana de controles para calibración y barrido del software Simple RA.	136
Imagen 51. Controles sección izquierda superior ventana simple RA.	137
Imagen 52. Controles sección derecha superior ventana simple RA.	139
Imagen 53. Ventana del detector simple RA con la cual ajustamos la posición de la señal, ampliación de la señal, el canal a utilizar, sincronismo y acoplamiento de la señal.	142
Imagen 54. Ventana espectral simple RA. Además de mostrar formas de onda, la pantalla se llena con detalles sobre los valores de control de la forma de onda.	143
Imagen 55. Panel de control de la pantalla espectral simple RA.	145
Imagen 56. Gráfico de flujo GRC Simple_Ra	147
Imagen 57. Diagrama de flujo para la realización de una observación, toma de muestras y procesamiento.	150
Imagen 58. BW 2 MHz-FFT 1024-Fcentral 1420 MHz. Aproximadamente 15 minutos de observación más 4 minutos de proceso off-line, sin calibración.	152
Imagen 59. Pasaje a Kms/s y primer barrido calibración 15 minutos de observación, VSLR corregido.	153
Imagen 60. Localización de la radiofuente segundo barrido de calibración. Se continúan con errores en al apuntamiento.	154

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Imagen 61. Perfil obtenido durante el barrido de observación luego de realizadas los barridos de calibración correspondientes..... 154

Imagen 62. HI survey of the sky at $\delta < -25^\circ$ E.M. Arnal - E. Bajaja - J.J. Larrarte - R. Morras - W.G.L. Pöppel. 155

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Lista de Tablas

Tablas 1. Distribución espectro radioeléctrico. (Min Ju, 2002).....	50
Tablas 2. <i>Medidas físicas de la antena monopolo</i>	65
Tablas 3. <i>Medidas físicas de la antena bocina circular</i>	72
Tablas 4. <i>Valores de eficiencia para diferentes anchuras y profundidades del anillo de bloqueo en la antena bocina circular</i>	79
Tablas 5. <i>Medidas físicas de la antena bocina circular con alimentación de monopolio</i>	79
Tablas 6. <i>Medidas físicas de la antena bocina circular con alimentación de monopolio</i>	101

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Capítulo 1

Introducción

A través del tiempo se han encontrado respuestas utilizando la integración entre el razonamiento y la observación coherente, los cuales han llevado al hombre a comprender el entorno para luego dar demostraciones más acertadas de los sucesos naturales; sucedió con la teoría que describe el movimiento del sistema solar, cuando Kepler apoyado en la obra escrita por Copérnico deduce sus tres leyes, quedando totalmente refutados los modelos de movimiento desarrollados por Ptolomeo (teoría geocéntrica), se presenta cuando Newton adapta la gravedad a los astros del sistema solar, aparece cuando Maxwell unifica la electricidad con el magnetismo, con la teoría de la relatividad pensada por Albert Einstein quien explicó de una manera más precisa la estructura espacio-temporal de la naturaleza.

Como vemos el hombre durante todo su historia se ha cuestionado por la que observa en las profundidades del universo, se ha preguntado por sus formas, su funcionamiento, las leyes físicas que lo gobiernan para luego construir una explicación coherente a todo esto mediante su observación, lo que lo ha encaminado en una carrera acelerada por la construcción de equipos que cada día le permiten llegar más lejos logrando comprender así un poco más las maravillas del espacio exterior, pero a medida que se incursiona en las profundidades del cosmos se ha dado cuenta que se vive en un conglomerado de cuerpos asombrosamente complejo que para entenderlo se necesita desarrollar metodologías basadas en las investigaciones científicas, tomando los avances tecnológicos como punto de partida para mejorar los modelos que permitan una explicación más acertada acerca de los movimientos de estructuras celestes, que se han dado a conocer por diferentes fenómenos físicos como la radiación de energía electromagnética que ha sido la forma más acertada de entender los fenómenos naturales en la época actual.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

La captura y procesamiento de las ondas de radio le han permitido a la astronomía tener una nueva ventana de observación, que en la actualidad se potencia como una de las mejores técnicas para buscar y clasificar cuerpos y elementos en el espacio, estas observaciones se desarrollan utilizando la radiación electromagnética emitida desde las profundidades del cosmos por los cuerpos radiantes, la cual es capturada por antenas de radio frecuencia diseñadas especialmente para detectar las perturbaciones de las ondas electromagnéticas generadas por la radiación. A las que se les realiza un proceso de filtrado para luego clasificarlas y determinar qué tipo de cuerpo o elemento se encuentra en la zona escamoneada. (RON, 2012)

1.1 Motivación

Gracias a la evolución de las comunicaciones el hombre ha desarrollado nuevas herramientas tecnológicas y se ha apropiado de nuevos conocimientos, entre ellos y uno de los más importantes, es el significado y el comportamiento de las ondas electromagnéticas, al punto de que el hombre se ha apropiado del espectro electromagnético. Con dicha apropiación ha desarrollado artefactos y dispositivos, que han mejorado la calidad de vida de muchas personas alrededor del mundo; y con ello ha creado nuevos campos de estudio, nuevas ciencias tales como comunicaciones espaciales y la radioastronomía.

El Reglamento de las Telecomunicaciones Internacionales (RTI) de la Unión Internacional de Telecomunicaciones, define telecomunicación como: “Toda transmisión, emisión o recepción de signos, señales, escritos, imágenes, sonidos o informaciones de cualquier naturaleza por hilo, radioelectricidad, medio ópticos u otros sistemas electromagnéticos”. (Unión Internacional de Telecomunicaciones, 1989). Además, define a la radioastronomía como: “Astronomía basada en la recepción de ondas radio-eléctricas de origen cósmico”. (Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2003).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Gracias a estas definiciones proporcionadas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones vemos una interacción de las Telecomunicaciones con diferentes ciencias, debido al conocimiento y utilización de las ondas electromagnéticas.

Esto nos ha servido de inspiración para la elaboración del presente trabajo ya que como ingenieros en Telecomunicaciones podemos aportar a otros temas de la ciencia como la radioastronomía que nos brinda diferentes posibilidades para explotar los conocimientos adquiridos, además se abre la posibilidad que un país como Colombia incursione de una manera seria y científica en el análisis del espacio profundo con técnicas modernas de observación como las que nos brinda la radioastronomía.

Desde el punto de vista teórico, esta investigación generará reflexión y discusión tanto sobre el conocimiento existente del área investigada, así como de la interacción de las ondas electromagnéticas en el nuevo contexto de la exploración espacial, abriendo las puertas a nuevos conceptos que día a día han ido enriqueciendo desarrollos tecnológicos.

Desde el punto de vista metodológico y práctico, este trabajo de investigación permitirá establecer un conjunto de aportes que orientarían el desarrollo de cualquier proceso dirigido a la radioastronomía en nuestro país, teniendo como punto de partida el diseño de instrumentos para la recolección de datos los cuales permitirán la realización de análisis de resultados en cuanto a procesamiento de señales.

Otro de los aportes de este trabajo, se encuentra en el hecho de que a través de su ejecución, se abren las posibilidades de integrar un grupo de trabajo con las diferentes ingenierías ofrecidas en la institución, si en algún momento estos datos se pudiesen materializar ya que la radioastronomía integra conceptos de electrónica, sistemas, electromecánica, mecatrónica y física.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1.2 Planteamiento del problema y preguntas de investigación

Desde hace 50 años se estudian los objetos existentes en el Universo mediante el análisis de las ondas de radio que los mismos emiten. Estas señales, generalmente muy débiles, pueden ser recibidas de objetos localizados en los confines de nuestro Universo.

Varios de los problemas que esta parte de la astronomía estudia (estructura del medio interestelar, fuentes de energía de los rayos gamma, formación estelar, pulsares, cuásares y radio galaxias) no pueden ser estudiados desde los laboratorios ópticos; incluso se ha descubierto que nuestra Galaxia no sólo está compuesta de un conjunto de estrellas, sino que también hay, entre ellas, grandes cantidades de hidrógeno frío que es invisible a la observación con instrumentos ópticos (Moskalenko, 2013).

Hasta hace muy poco se necesitaba una compleja cantidad de equipos y dispositivos para implementar sistemas de radioastronomía pequeños capaces de observar la línea de hidrógeno, y las emisiones continuas desde el plano galáctico.

La aparición de nuevas herramientas (Software Defined Radio, SDR) para el uso de las radiofrecuencias con fines educativos y de investigación ha permitido un nuevo examen de los actuales sistemas de radioastronomía y comenzar a reproducir dispositivos avanzados para el estudio de la misma. Esto conlleva a que cada día se despierte mayor interés en la investigación de ciertos fenómenos que ocurren en el espacio, a través de diseños propios de pequeños radiotelescopios.

En este orden de ideas cabe preguntarse: ¿será posible utilizar estos nuevos conceptos y poder diseñar un radiotelescopio para realizar observaciones en el rango de los 1420 MHz?, ¿en qué medida el diseño de un radio telescopio para la adquisición de señales en la frecuencia 1420MHz (hidrogeno neutro) aportará a los procesos de formación académicos afines con la captura y procesado de señales radioeléctricas? Las preguntas de investigación planteadas buscan desarrollar y relacionar diferentes tópicos como: 1) el diseño de antenas

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

para la adquisición de señales de radioastronomía en la banda 1420 MHz, 2) el procesamiento de señales digitales, 3) Análisis de señales radioeléctricas utilizando el software GNU Radio.

El marco teórico y el estudio de la literatura que se desarrollan en las siguientes páginas darán el soporte necesario para desarrollar el planteamiento del problema del trabajo de investigación.

1.3 Objetivos del trabajo de grado

General: Diseñar un sistema para la captura de señales radioeléctricas generadas por el hidrógeno utilizando como punto de partida algunas técnicas desarrolladas en radio astronomía para el análisis de los datos.

Específicos

1. Definir el diseño de la antena para la adquisición de señales de radioastronomía en la banda 1420 MHz.
2. Seleccionar técnicas que permitan realizar procesamiento de señales digitales, para luego realizar el análisis de señales radioeléctricas en la banda 1420 MHz.
3. Analizar señales radioeléctricas generadas por la radiación electromagnética en la banda 1420 MHz. utilizando bases de datos ya existentes.

1.4 Metodología propuesta

La radio astronomía pretende mejorar las técnicas de observación del espacio profundo, utilizando la optimización de recursos en la construcción de antenas, receptores y dispositivos que influyen en la recepción y procesado de señales. Es por esto que se hace necesario diseñar y simular una antena que capture señales de radio ubicadas en la

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

frecuencia de 1420MHz (frecuencia del hidrogeno neutro HI), a las cuales se les podrá realizar el procesamiento de señales digitales mediante GNU Radio.

Por lo tanto algunos de los aspectos que se tendrán en cuenta para la realización del presente estudio son.

- Establecer características importantes de las ondas electromagnéticas y del diseño de antenas.
- Definir el software para diseño y simulación de la antena para la frecuencia de 1420MHz.
- Mostrar posibles resultados que se pueden obtener con estos diseños si pasa a la etapa de montaje y captura de señales radioeléctricas.

Además para poder cumplir con los objetivos propuestos se desarrolló un plan de trajo que muestra las fases desarrolladas.

1.4.1 Plan de trabajo

Este plan de trabajo se desarrollara a partir en dos frentes fundamentales, teórico y práctico, las cuales aportarán el entorno metodológico para el cumplimiento de los objetivos de la investigación.

Teórico. Se realizó la caracterización de recepción y modelado de antenas receptoras de señales radioeléctricas en la frecuencia de 1420MHz. Asimismo, se presenta la forma estructural para realizar el proceso de señales digitales mediante GNU Radio, teniendo como punto de partida una revisión del estado del arte que permite comprender de una manera más conceptual el objeto de estudio y la terminología conceptual para el desarrollo del proyecto.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Práctica. En esta etapa se realizará el desarrollo del diseño y simulación de la antena receptora de señales radioeléctricas para la frecuencia de 1420MHz, además del tratamiento específico para procesamiento digital de señales radioeléctricas utilizando GNU Radio.

Partiendo de esta idea, tanto la fase teórica como práctica se desarrollan en tres etapas que permiten el buen desarrollo del presente estudio.

ETAPA 1: En esta etapa se desarrolló el diseño del sistema de adquisición de señales radioastronómicas; la cual se desglosa en dos partes:

- El análisis de la información.
- El diseño.

Para esta etapa del proyecto se contó con la participación de dos grandes colaboradores: El señor Fred K. Y. Lo, Director del National Radio Astronomy Observatory, USA (NRAO), quién inicialmente nos apoyará con el curso ESSENTIAL RADIO ASTRONOMY, con el cual se pretenderá aprender las bases fundamentales de la radioastronomía.

El señor Guillermo M. Gancio encargado del diseño de circuitos impresos para el proyecto de la base de tiempo (Observatorio) e Ingeniería de detalle de los conversores analógicos digitales en los radiómetros de 23.8 y 36.5 GHz para la misión Aquarius del Instituto Argentino de Radioastronomía (IAR), quién bajo la aprobación del ingeniero Daniel O. Perilli nos facilitó una base de datos de señales radioastronómicas de la antena I V2 y el manual Basics of Radio Astronomy for the Goldstone-Apple Valley Radio Telescope. De igual forma, de artículos y presentaciones elaborados por el instituto para el correcto análisis de los conceptos necesarios en la elaboración del presente trabajo.

Se utilizaron ambos aportes como punto de partida para la comprensión física de la generación y transporte de las ondas electromagnéticas a través del espacio. Bajo el análisis de toda esta información se comenzó entonces con el diseño de una antena tipo parabólica, una bocina circular con alimentación a través de un monopolo, con las características necesarias para captura de forma eficiente este tipo de señales.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Se simuló en el software FECO en el cuál se evidenciaron las características óptimas de la antena seleccionada para la adquisición de señales radioastronómicas en la banda de 1420 MHz.

ETAPA 2: En esta etapa se diseñó del Sistema de Adquisición de Señales.

Se utilizaron conceptos de Software Defined Radio (SDR) como uno de los nuevos aportes de la tecnología para la realización de experimentos de radioastronomía, además, del GNU radio para el procesamiento digital de las señales. En el diseño se propuso trabajar con un RTL-SDR Blog marca R820T2 RTL2832U Dongle.

ETAPA 3: En esta etapa se desarrolló el Procesamiento de Señales, a partir de la base de datos que físicamente (facilitó el señor Guillermo Cancio (IAR)) se realizó un análisis de las emisiones de radiación del hidrógeno neutro en radiofuentes calibradoras (Radiofuentes conocidas y desarrolladas en varios artículos científicos) y realizar comparaciones entre las nuevas observaciones y datos ya procesados de una base de datos internacional.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Capítulo 2

Inicio de la radio astronomía, radio telescopio superheterodino.

Este capítulo está dividido en dos partes, en la primera instancia se realizará una reseña histórica donde se mostrará el inicio de la radio astronomía, su importancia en la época actual y el potencial para tiempos futuros en el campo de la astronomía.

En la segunda parte se mostraran los diferentes elementos que componen un radio telescopio superheterodino donde se muestra la importancia de éste en el desarrollo de las investigaciones del espacio profundo.

2.1 Historia del inicio de la radio astronomía

Alrededor del año 1860, las ecuaciones de James Clerk Maxwell demostraron que la radiación electromagnética se asociaba con la electricidad y el magnetismo, además podrían existir en cualquier longitud de onda. La teoría de Maxwell obtuvo gran apoyo gracias a los experimentos del joven científico alemán Heinrich Hertz quien en 1888 logró producir en su laboratorio ondas electromagnéticas.

Debido a esto, varios científicos especularían que los objetos celestes tales como el sol y las estrellas podrían generar ondas de radio.

A finales del siglo XIX se hicieron varios intentos para detectar emisiones de radio del Sol realizados por diferentes grupos, entre los que podemos citar al propio Nikola Tesla, Thomas Alva Edison el inventor Norteamericano, Sir Oliver Lodge en Inglaterra y los alemanes J. Wilsing y J. Scheiner, pero esos intentos no fueron capaces de detectar emisión alguna, debido a las limitaciones técnicas de sus instrumentos.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Un joven estudiante de doctorado en la universidad de París, Charles Nordmann quiso mejorar el trabajo de los alemanes quien falló ya que el sol se encontraba en su ciclo de 11 años de mínima actividad.

A finales de los años 20, un joven ingeniero americano, Karl Guthe Jansky, estaba trabajando en Holmdel (New Jersey) en la investigación de la estática que interfería con las transmisiones transatlánticas de voz para comunicaciones de onda corta. Construyó una antena formada por una estructura metálica en forma de jaula y la suspendió sobre las ruedas de un viejo Ford, de manera que un motor pudiera hacerla girar en diferentes direcciones.

Después comenzó un largo y paciente trabajo de recopilación de datos, registrando los diversos tipos de ruidos de radio captados en diferentes longitudes de onda, pero sobre todo en las ondas cortas y desde varias direcciones del cielo, donde se encontró un ruido de fondo con periodo de 23 horas y 56 minutos (día estelar).

Los resultados de este trabajo indicaron la existencia de tres tipos de interferencias: descargas breves procedentes de temporales locales; descargas análogas correspondientes a temporales muy lejanos: silbidos persistentes procedentes de una misteriosa fuente en movimiento regular a través del cielo.

Luego de meses de intensa investigación, Jansky finalmente analizó que la fuente de radiación alcanzó su punto máximo cuando su antena apuntaba a la parte más densa de la Vía Láctea, en la constelación de Sagitario; además, evidenció que ya que el Sol no era un gran emisor de ruido de radio, las interferencias extraña de radio podían ser generadas por el gas y el polvo interestelar de la galaxia. Karl Guthe Jansky había hecho el descubrimiento de la primera fuente radioastronómica por casualidad.

Al comparar sus observaciones con mapas astronómicos ópticos, Jansky anunció este descubrimiento en 1933, quería investigar las ondas de radio de la Vía Láctea con más detalle, pero Bell Labs lo reasignó a otro proyecto, por lo que no hizo más trabajo en el campo de la astronomía. Sin embargo, sus esfuerzos pioneros en el campo de la astronomía

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

de radio han sido reconocidos, en la actualidad se ha nombrado a la unidad fundamental de la densidad de flujo espectral como Jansky (Jy) en honor a él.

Años más tarde, Grote Reber fue inspirado por el trabajo de Jansky, y construyó un radiotelescopio parabólico de 9 m de diámetro en su propia casa en 1937. Comenzó repitiendo las observaciones de Jansky, y pasó a realizar el primer estudio del cielo en las frecuencias de radio. El 27 de febrero de 1942, J. S. Hey, un oficial de la investigación del Ejército británico, hizo la primera detección de las ondas de radio emitidas por el sol.

A partir de estas investigaciones iniciales comenzaría a desarrollarse una ciencia que llevaría al hombre mucho más allá de su propia imaginación. (Sullivan Woodruff T, 2009)

2.2 Historia línea 21 cm

El Profesor Jan Hendrik Ort fue uno de los pocos astrónomos que entendió el potencial científico de los datos de radiofrecuencia, hasta entonces considerados como una curiosidad en el campo de la ingeniería. Su visión progresista lo impulsa a postular la idea de poder observar líneas de emisión de cierto elemento que habita el espacio interestelar, al contar con las herramientas necesarias para determinar la cantidad de energía que provoca la excitación de dicho elemento se podrían obtener los suficientes datos con que calcular las velocidades radiales (a lo largo de la visual) y los movimientos dinámicos de la Galaxia.

Ort encomendó a Hendrick Van de Hulst, un joven estudiante de doctorado, estimar las probabilidades de poder observar la emisión de líneas en ondas de radio. Luego de estudiar el tema, este joven ultimó que el elemento con más posibilidades de ser detectado en el espacio interestelar era el hidrógeno neutro (HI), en la zona de las micro-ondas y factible para la tecnología electrónica de entonces.

La predicción fue publicada en una publicación holandesa, en 1945. Concluida la 2a Guerra Mundial, la teoría fue conocida, originando una carrera entre varios países para detectar la línea de 21 cm. del HI. El descubrimiento se produjo casi a la par (diferencias de un par de semanas) en 1951 en tres lugares: Harvard, Leiden y Sídney.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

A partir de entonces, la radioastronomía logró gran importancia a nivel científico lo cual se tradujo en diversos proyectos de radiotelescopios en el mundo y un crecimiento exponencial en la cantidad de información que se fue recogiendo y que permitió ver que la línea de HI podía detectarse prácticamente en cualquier dirección del cielo a que el radiotelescopio apuntara.

2.2.1 Importancia de la Línea 21 Cm

Durante el siglo XIX y comienzos del siglo XX, la astronomía había dado a conocer la forma y una aproximada distribución del volumen de las estrellas en nuestra galaxia (la Vía Láctea). Sin embargo, nada se sabía acerca de la estructura y cinemática interna de la misma: ¿existían brazos espirales?, ¿Se movían?, ¿Cómo?

El problema para poder encarar estas preguntas radicaba en el hecho que la luz emitida por las estrellas es absorbida por el polvo interestelar lo que nos proporciona observaciones hasta cierta distancia cuando miramos en una dirección en el plano galáctico.

Como el polvo interestelar es totalmente transparente a las ondas de radio, con el florecimiento de la radioastronomía, se encontró una posibilidad de responder las incógnitas acerca de la estructura y cinemática de nuestra galaxia, de la cual por estar dentro de ella conocíamos tan poca cosa; se necesitaba saber que datos nos proporcionarían la información necesaria para desvelar este misterio. La respuesta la encontró el joven Van de Hulst, quien en 1945 estableció la posibilidad de detectar el hidrogeno neutro interestelar en su línea de emisión (21 cms de longitud de onda), la cual se detectaba por primera vez en 1951.

A partir de los primeros mapas del hidrógeno neutro en la galaxia, se han hecho importantes aportes al conocimiento astronómico como lo son: la estructura, rotación galáctica y tamaño de la vía Láctea, la distribución de las regiones H I en la Vía Láctea (ver Imagen 5), el estudio de cúmulos y supercúmulos de galaxias en la frecuencia de 1420 MHz para evidenciar la presencia de materia en el espacio galáctico, además, una invaluable

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

información sobre el campo magnético galáctico y sobre las propiedades del medio magneto-iónico.

La (Imagen 1) muestra la distribución de hidrógeno atómico en todos los lugares en el cielo. Todo esto de hidrógeno está en nuestra galaxia. El color rojo indica las direcciones de alta densidad de hidrógeno, azul y negro muestran áreas con poco hidrógeno, estos datos proceden de las mediciones de la línea de 21cm de hidrógeno mediante radiotelescopios. Algunos de los lazos de hidrógeno esbozan viejos remanentes de supernova. (JM Dickey, 2001)

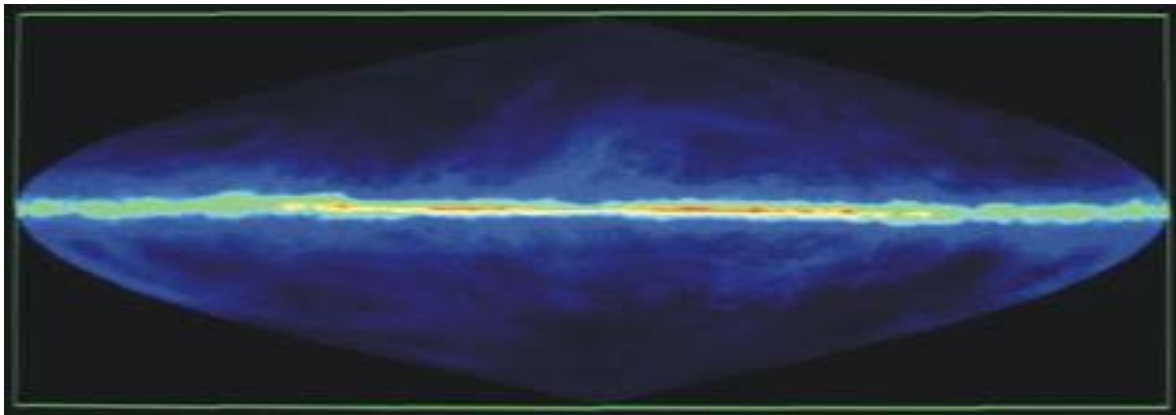


Imagen 1. Distribución de las regiones HI en la Vía Láctea.

Esta imagen muestra la distribución de hidrógeno atómico en todos los lugares en el cielo. El color rojo indica las direcciones de alta densidad de hidrógeno, azul y negro muestran áreas con poco hidrógeno.

2.2.2 La línea de 21 cm del HI

La línea de 21 cm es el resultado del desdoblamiento hiperfino del estado fundamental del átomo de hidrógeno y se crea a partir del acoplamiento de los espines del protón y el electrón. La transición del espín del electrón de paralelo ($F = 1$) a antiparalelo ($F = 0$), en la Imagen 2 se ve cómo un átomo de hidrogeno excitado gana energía, permite al protón y al electrón alinear las direcciones de giro, además se puede ver cuán el átomo regresa a un estado de reposo, proceso con el cual el átomo expulsa un fotón cuya frecuencia es conocida con gran precisión. $f = 1420405751.786 \pm 0.001 \text{ Hz}$, con una diferencia de energía de 5,87433 eV y que corresponde a una longitud de onda aproximada de 21 cm.

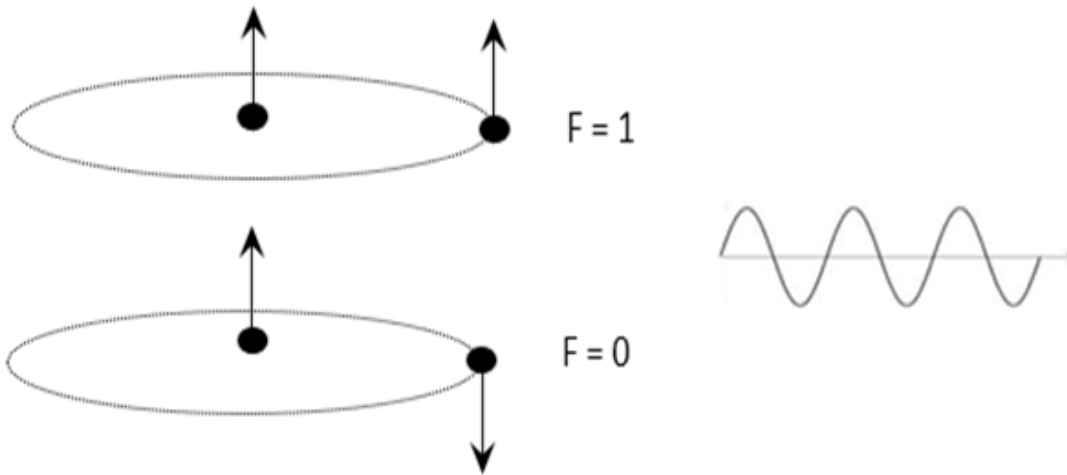


Imagen 2. Transición hiperfina del átomo del Hidrógeno.

2.2.3 Espectros atómicos

Cuando un gas atómico se excita apropiadamente a una presión sutilmente inferior a la atmósfera emite un espectro de radiación que posee ciertas longitudes de onda. Los espectros atómicos adquiridos de distintos elementos se conocen como espectros de líneas de emisión (ver Imagen 3). Cada elemento da lugar a un espectro de emisión de líneas único; es por eso, que se compara estos espectros a las huellas digitales de los elementos.

Las bandas deben su origen a las rotaciones y vibraciones de los átomos en una molécula electrónicamente excitada. En la imagen 3 se muestran Líneas atómicas de emisión de hidrógeno en la región visible del espectro las cuales corresponden de derecha a izquierda a las longitudes de onda del naranja 656.3 nm, verdeazul 486.1 nm, añil 434.1 nm y violeta 410.2 nm. (Harris, 2007)



Imagen 3. Líneas atómicas de emisión de hidrógeno en la región visible del espectro. (Dill, 2005).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.3 Descubrimiento del polvo interestelar

El medio interestelar corresponde al 1% de la masa total de la Galaxia y está formado principalmente por un gas confuso difícil de observar.

A principios del siglo XIX William Herschel, descubrió una mancha negra en la Vía Láctea, alrededor de ella brillaban innumerables estrellas, pero dentro de la mancha no había nada. Herschel se preguntó si indudablemente eran “agujeros en el cielo”, zonas de la bóveda celeste donde no había estrellas o, en cambio, nebulosas oscuras que las ocultaban. El descubrimiento observacional del polvo interestelar lo hace Robert Julius Trumpler, quién, en 1930, estudió la relación entre el brillo aparente y el diámetro angular de los cúmulos abiertos. Era de esperar la dependencia lineal entre el brillo y el cuadrado del diámetro angular (proporcional al inverso del cuadrado de la distancia). No obstante, Trumpler encontró que los cúmulos más lejanos eran menos brillantes de lo esperado: su luz era absorbida por el polvo interestelar.

2.4 Descubrimiento del gas interestelar

Uno de los mayores descubrimientos realizados con el doble refractor de Potsdam fue el descubrimiento del medio interestelar; además de cada componente se podía observar una línea adicional de Ca II estacionaria en la estrella binaria sigma Orionis, que es una de las estrellas del cinturón de Orión; la duda era si la línea correspondía a gas circunestelar o interestelar. Posteriormente, se encontró el mismo patrón varias estrellas lo cual confirmaba su origen interestelar. El medio interestelar resultaba estar lleno de nubes de gas frío en movimiento.

2.5 El gas atómico de la Galaxia

El gas atómico de la Galaxia, está constituido principalmente por hidrógeno, el cual se encuentra concentrado en las nubes difusas de hidrógeno neutro. Estas nubes son llamadas

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

regiones H I, y su particularidad radica en el hecho de tener densidades relativamente bajas ($n \cong 1 - 100\text{cm}^{-3}$) y temperaturas $T < 100\text{K}$. En estas condiciones, el hidrógeno está totalmente en su forma atómica neutra. Los eventuales iones que se forman se recombinan rápidamente y las moléculas son demolidas sin ningún esfuerzo por la radiación ultravioleta que empapa al medio interestelar.

La abundancia de hidrógeno en el medio interestelar era absolutamente desconocida hasta que se logró observar la transición hiperfina del átomo de hidrógeno a una longitud de onda de 21 cm. De esta forma se pudo obtener información sobre su distribución en la Galaxia. Las nubes difusas de hidrógeno atómico tienen masas aproximadamente a un centenar de masas solares y están empapadas por un gas internube mucho más ligero y caliente, a través del cual, el hidrógeno está ionizado por partes (10–20% de ionización). En conclusión, el gas atómico (nubes difusas + gas internubes) compone la mitad de la masa del medio interestelar galáctico. (Ronald Reynolds, 2002)

2.6 Esquema de un Receptor Superheterodino

Los receptores superheterodinos presentan características similares a cualquier receptor de radio que opera en una frecuencia específica, la única diferencia de este sistema receptor es que opera en una longitud de onda más pequeña que facilita la construcción de estructuras. Además, la frecuencia de operación de este esquema coincide con la del hidrogeno neutro, uno de los elementos más abundantes en el universo, es por esto que muchos receptores son construidos para esta frecuencia en específico.

En este receptor las partes se encuentran ubicadas como lo muestra la Imagen 4.

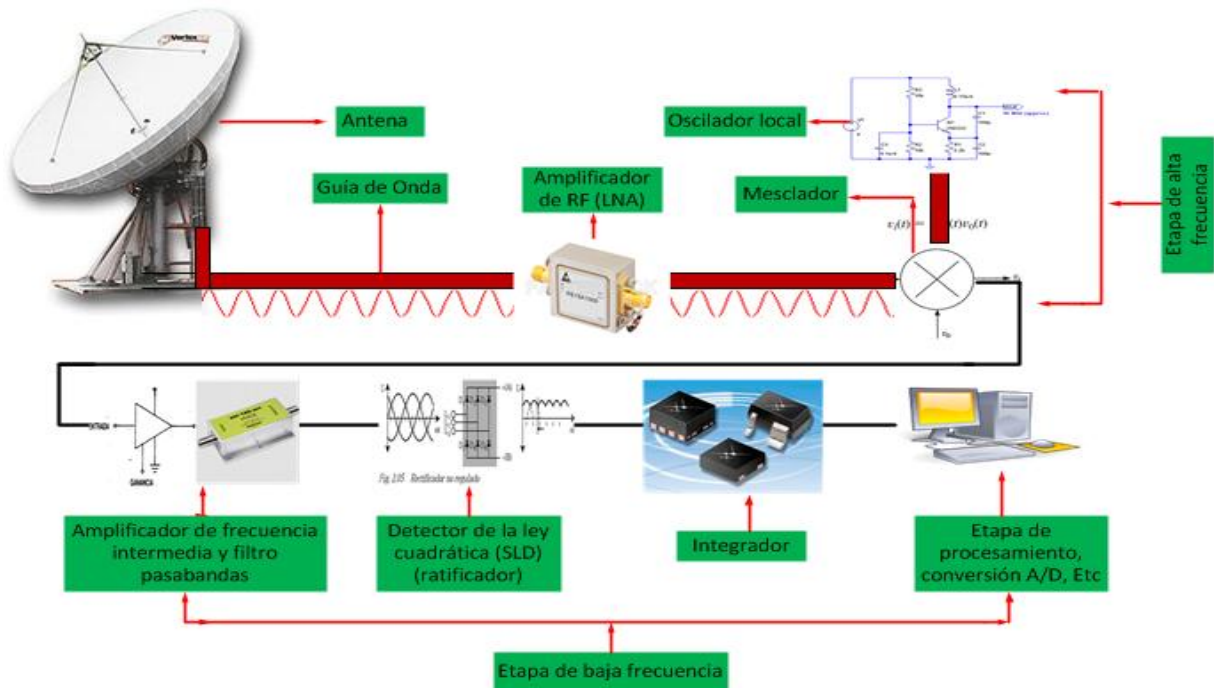


Imagen 4. Esquema de un receptor superheterodino

2.6.1 Antena

En forma general una antena es un arreglo que cumple la función de radiar o recibir radiación electromagnética que puede provenir de otras antenas ubicadas en diferentes dispositivos electrónicos o señales generadas por cuerpos y elementos del espacio.

Esta parte del sistema es la que se encarga de tomar la radiación en forma de energía de la señal electromagnética, para transformarla en una diferencia de potencial la cual puede ser trasportado atreves de circuitos eléctricos para ser analizada.

2.6.2 Guía de onda

Es el medio por el cual se trasporta la onda electromagnética en forma de energía que es capturada por la antena.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.6.3 Amplificador de RF (LNA)

Este dispositivo está diseñado para operar en la frecuencia de la señal, además los márgenes de ruido que este introducen en el sistema son muy bajos ya que las señales cósmicas son muy débiles y se necesitan amplificadores de mucha ganancia y que generen poco ruido.

2.6.4 Mezclador y oscilador local

En esta etapa todavía se tiene una señal de alta frecuencia proveniente de la antena y si quisiéramos realizar la digitalización de la señal se necesitarían muestras del orden de gigas por segundo debido al “teorema de Nyquist”, y en la actualidad no existe la tecnología capaz de realizar ese procesamiento. Es por esto que se realiza la etapa de mezclado de la señal con una base sinusoidal, que nos permite multiplicar las dos señales para luego utilizar la teoría de las transformadas de Fourier de la siguiente manera.

Supongamos que tenemos dos señales una es la señal original capturada por la antena y la otra es la señal base representadas de la siguiente manera.

$$A(t) = a \cos(w_1 t) \text{ Señal original (2.1)}$$

$$B(t) = b \cos(w_1 t + \phi_2) \text{ Señal base (2.2)}$$

Ahora si multiplicamos (2.1) y (2.2) en el dominio del tiempo tenemos como resultado la función.

$$g(t) = A(t) \times B(t) = ab \cos(w_1 t) \cos(w_2 t + \phi_2) \text{ (2.3)}$$

Luego si recurrimos a las identidades fundamentales del coseno:

$$\cos(\gamma + \theta) = \cos(\gamma) \cos(\theta) + \text{sen}(\gamma) \text{sen}(\theta) \text{ (2.4)}$$

$$\cos(\gamma - \theta) = \cos(\gamma) \cos(-\theta) + \text{sen}(\gamma) \text{sen}(-\theta)$$

$$\cos(\gamma - \theta) = \cos(\gamma) \cos(\theta) - \text{sen}(\gamma) \text{sen}(\theta) \text{ (2.5)}$$

Posteriormente si sumamos (2.4) y (2.5) tenemos como resultado.

$$\cos(\gamma) \cos(\theta) = \frac{1}{2} [\cos(\gamma + \theta) + \cos(\gamma - \theta)] \text{ (2.6)}$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Similarmente podemos ver que la señal de la ecuación (2.3) se puede escribir como.

$$g(t) = ab \cos(w_1 t) \cos(w_2 t)$$

$$= \frac{ab}{2} (\cos((w_1 + w_2)t + \phi_2) + \cos((w_1 - w_2)t - \phi_2)) \quad (2.7)$$

La ecuación (2.7) se conoce como modulación:

Ahora notemos que si $w_1 \equiv w_2$ se obtiene en la salida las funciones:

$$g(t) = \frac{ab}{2} (\cos((w_1 + w_2)t + \phi_2)) \quad (2.8) \text{ Señal de alta frecuencia}$$

$$g(t) = \frac{ab}{2} \cos((w_1 - w_2)t - \phi_2) \quad (2.9) \text{ Señal con más baja frecuencia}$$

Por lo tanto podemos utilizar un filtro pasa bajas para que me elimine las frecuencias altas y solo me queden las bajas las cuales se les puede realizar procesamiento. Además de esta se necesita un oscilador que permita generar señales patrón para poder cumplir con la etapa de mezclado.

2.6.5 Amplificador de frecuencia intermedia y filtro pasa bandas

En esta etapa se toma la señal que sale del mezclador se amplifica y se utiliza un filtro pasa bandas para que limite el ancho de banda, quedando solamente la señal que se desea analizar.

2.6.6 Detector de la ley cuadrática

El detector de la ley cuadrática es un dispositivo que opera como una etapa de ratificación, donde se tiene en la salida un voltaje que es proporcional al cuadrado de la entrada.

2.6.7 Integrador

Es un mecanismo electrónico que en su salida realiza el proceso matemático de integración, su funcionamiento es similar al de un filtro pasa bajos que permite eliminar las

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

componentes de alta frecuencia. Este dispositivo se puede ver como un sistema compuesto por resistencia y condensador acoplado con un amplificador operacional.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Capítulo 3

Ondas electromagnéticas, características fundamentales de las señales y espectro electromagnético.

En este capítulo se realizará una recopilación de los principios básicos que caracterizan el movimiento una onda electromagnética que viaja en el espacio libre, teniendo como punto de partida las ecuaciones de James Clerk Maxwell, que son las leyes fundamentales del electromagnetismo. Además de esto se realizará una explicación de las diferentes zonas del espectro electromagnético donde se podrán observar las características de cada región, como la frecuencia y tecnología que pueden ser desarrolladas.

3.1 Ondas electromagnéticas

Las ondas electromagnéticas se generan cuando se presentan casos de cargas eléctricas en movimiento, su propagación se realiza mediante las oscilaciones de los campos eléctrico y magnético. Estas señales viajan en el espacio libre con una velocidad igual a la de la luz, hecho que demostró Maxwell. Estas ondas cuentan con parámetros característicos tales como frecuencia, longitud de onda, polarización, amplitud.

3.2 Ecuaciones de Maxwell

Cuando se empezaran a desarrollar la teoría electromagnética, los investigadores modelaban el campo eléctrico y la carga separada de las corrientes y los campos

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

magnéticos. Esto se estudió de la misma manera hasta que en el siglo XIX “Faraday demostró que un campo magnético variante en el tiempo genera un campo eléctrico” (Jordan, 1973).

Además Faraday estaba convencido de la doble implicación de esta hipótesis (un campo eléctrico también genera al campo magnético). Idea que no pudo probar, pero que tiempo después sería demostrado por James Clerk Maxwell que llegó a la conclusión que las hipótesis de Faraday eran verdaderas y además presentó las corrección de la ley de ampere y la conservación de la carga para que fueran correctas, hecho que se presenta en las ecuaciones (3.1) y (3.2). (Jordan, 1973)

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}_f \Rightarrow \vec{\nabla} \cdot \vec{J}_f = 0 \quad (3.1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J}_f + \frac{\partial \rho_f}{\partial t} = 0 \quad (3.2)$$

En sus razonamientos Maxwell comprendió que la conservación de la carga solo se da si se le agrega la corriente de desplazamiento a la ley de Ampere, teniendo en cuenta que la ley de gauss hace la relación de D con ρ_f de la siguiente manera $\vec{\nabla} \cdot D = \rho_f$ debido a esta corrección hecha por Maxwell se puede llegar a la conclusión de que las ondas electromagnéticas viajan a la velocidad de la luz.

Entonces el conglomerado de ideas que se presentan en las ecuaciones de Maxwell son las leyes fundamentales del electromagnetismo.

Forma diferencial e integral de las ecuaciones de Maxwell.

$$\text{Ley de Faraday-Henry, } \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \Rightarrow \oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (3.3)$$

$$\text{Ley de Ampere-Maxwell, } \vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}_f + \frac{\partial D}{\partial t} \Rightarrow \oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \vec{J}_f \cdot d\vec{s} + \frac{d}{dt} \int_S D \cdot d\vec{s} \quad (3.4)$$

$$\text{Ley de Gauss, } \vec{\nabla} \cdot D = \rho_f \Rightarrow \oint_S D \cdot d\vec{s} = \int_V \rho_f dv \quad (3.5)$$

$$\text{Ley de Gauss } \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \Rightarrow \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0 \quad (3.6)$$

$$\text{Ley de Conservación de la carga } \vec{\nabla} \cdot \vec{J}_f + \frac{\partial \rho_f}{\partial t} = 0 \Rightarrow \oint_S \vec{J}_f \cdot d\vec{s} + \int_V \rho_f dv \quad (3.7) \quad (\text{Markus, 1983})$$

Donde:

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$\vec{\nabla}$ = Operador rotacional

\vec{E} = campo eléctrico

\vec{B} = campo magnético

D = desplazamiento eléctrico

\vec{H} = intensidad de campo magnético

ρ_f = Densidad de carga

ϵ_0 = Permitividad

μ_0 = Permeabilidad

I = corriente eléctrica

\vec{J} = densidad de corriente

3.2.1 Deducción de la ecuación de onda partiendo de las leyes del electromagnetismo

Para explicar el concepto de onda electromagnética se tomará como punto de partida las ecuaciones de Maxwell aplicadas a un punto del espacio que se caracteriza por el vector de posición (\vec{r}) en el instante (t). Además ($\rho = 0$), ($j = 0$), por tanto las ecuaciones que representan los movimientos electromagnéticos quedan expresadas en forma diferencial de la siguiente manera.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E}(\vec{r}, t) = 0 \quad (3.8)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B}(\vec{r}, t) = 0 \quad (3.9)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E}(\vec{r}, t) = -\frac{\partial \vec{B}(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad (3.10)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B}(\vec{r}, t) = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad (3.11)$$

Ahora si queremos encontrar la ecuación de onda que se propaga en el vacío tenemos que aplicar el “operador rotacional a la ecuación de Faraday-Henry” (3.11) que expresa de la siguiente manera.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$\vec{\nabla}_x(\vec{\nabla}_x \vec{E}) = -\vec{\nabla}_x \left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) \quad (3.12)$$

Seguidamente tenemos que derivar primero con respecto al tiempo, y luego aplicando el rotacional tenemos: $\vec{\nabla}_x \left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla}_x \vec{B})$.

$$\vec{\nabla}_x(\vec{\nabla}_x \vec{E}) = -\frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla}_x \vec{B}) \quad (3.13)$$

Como el campo E cumple con la identidad $\vec{\nabla}_x(\vec{\nabla}_x \vec{E}) = \vec{\nabla}_x(\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - \vec{\nabla}^2 \vec{E}$ también se cumple con $\vec{\nabla}_x(\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - \vec{\nabla}^2 \vec{E} = -\left(\frac{\partial}{\partial t}\right)(\vec{\nabla}_x \vec{B})$ y sustituyendo las ecuaciones $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$ y $\vec{\nabla}_x \vec{H} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ tenemos la expresión.

$$-\vec{\nabla}^2 \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \left(\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \quad (3.14)$$

Lo que da como resultado la ecuación de onda.

$$\vec{\nabla}^2 \vec{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (3.15)$$

Si tomamos en cuenta una onda que se propaga en la dirección de los ejes coordenados x, y. Además $\vec{\nabla}^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2}$, la ecuación (3.15) queda expresada de la siguiente manera.

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (3.16)$$

Partiendo de las ecuaciones (3.15) y (3.16) podemos decir que una onda electromagnética en el vacío se propaga con una velocidad.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (3.17)$$

Para el vacío también se cumple la ecuación para el campo magnético \vec{B} de la siguiente manera. (Héctor Alzate L, junio de 2007)

$$\vec{\nabla}^2 \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad (3.18)$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.3 Radiación de campo lejano

Para realizar las observaciones en radioastronomía se necesita conocer cómo se comportan los copos de la onda electromagnéticas producidas por fuentes alejadas de los receptores, por lo tanto se realizará una descripción detallada para los campos radiados a grandes distancias.

Para empezar se puede “considerar los campos inducidos como cero” y además si se escoge como punto de partida la ecuación de continuidad $\nabla \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ se puede escribir el campo eléctrico radiado como una función del vector \vec{J} de la siguiente manera.

$$\vec{E}^r = \frac{jk}{4\pi\epsilon} \int_{\rho'} [\rho(\vec{r}')\hat{R} - \sqrt{\mu\epsilon}\vec{J}(\vec{r}')] \frac{e^{-jkR}}{R} d_{V'} \quad (3.19)$$

Además si asumimos que $\vec{K}R \gg 1$, $r \gg r'$ $R = |\vec{r} - \vec{r}'| = (r^2 + r'^2 - 2\vec{r} \cdot \vec{r}')^{\frac{1}{2}}$ y solo se toma “los dos primeros términos de la serie de Taylor” entonces se puede expresar a R de la siguiente manera teniendo en cuenta que se tiene rillos paralelos.

$$R = r(1 - 2\frac{\vec{r} \cdot \vec{r}'}{r^2})^{\frac{1}{2}} = r - \hat{r} \cdot \vec{r}' \quad (3.20)$$

$$\frac{e^{-jkR}}{R} = \frac{e^{jk\hat{r} \cdot \vec{r}'}}{R} \quad (3.21)$$


$$\hat{R} = \hat{r} \quad (3.22)$$

Por lo tanto si tenemos encuentra las expresiones (3.20), (3.21) y (3.22) el campo radiado lo podemos escribir de la siguiente manera.

$$\vec{E}^r \approx \frac{jke^{-jkr}}{4\pi\epsilon r} \int_{V'} [\rho(\vec{r}')\hat{r} - \sqrt{\mu\epsilon}\vec{J}(\vec{r}')] e^{jk\hat{r} \cdot \vec{r}'} d_{V'} \quad (3.23)$$

Ahora sustituyendo la ecuación de continuidad escrita de la siguiente forma $\rho(\vec{r}') = -\frac{1}{j\omega} \vec{\nabla}' \cdot \vec{J}(\vec{r}')$ en la ecuación (3.23), se puede expresar el campo radiado de la siguiente forma.

$$\vec{E}^r \approx \frac{jke^{-jkr}}{4\pi\epsilon r} \int_{V'} \left[\frac{-\hat{r}}{j\omega} \vec{\nabla}' \cdot \vec{J}(\vec{r}') - \sqrt{\mu\epsilon}\vec{J}(\vec{r}') \right] e^{jk\hat{r} \cdot \vec{r}'} d_{V'} \quad (3.24)$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Luego si utilizamos las propiedades de la transformación de la divergencia el campo radiado lo podemos reescribir de la siguiente manera.

$$\int_{V'} [\vec{\nabla}' \cdot \vec{J}(\vec{r}')] e^{jk\hat{r} \cdot \vec{r}'} d_{V'} = \int_{V'} \vec{\nabla}' \cdot [\vec{J}(\vec{r}') e^{jk\hat{r} \cdot \vec{r}'}] d_{V'} - \int_{V'} \vec{J}(\vec{r}') \cdot (\nabla' e^{jk\hat{r} \cdot \vec{r}'}) d_{V'} \quad (3.25)$$

Además si tenemos en cuenta que $\int_{V'} \vec{\nabla}' \cdot [\vec{J}(\vec{r}') e^{jk\hat{r} \cdot \vec{r}'}] d_{V'} = \oint_{S'} e^{jk\hat{r} \cdot \vec{r}'} \vec{J}(\vec{r}') \cdot d\vec{S}' = 0$ y al no existir corriente $\vec{J}(\vec{r}')$ que pase por la superficie con $\hat{r} = (\cos\alpha, \cos\beta, \cos\gamma)$ y $r = (x', y', z')$ con la que resulta expresión: $\nabla' e^{jk\hat{r} \cdot \vec{r}'} = \nabla' \exp(jk(x' \cos\alpha + y' \cos\beta + z' \cos\gamma)) = jk\hat{r} e^{jk\hat{r} \cdot \vec{r}'}$

Con la que se puede reescribir (3.25) de la siguiente forma.

$$\int_{V'} [\vec{\nabla}' \cdot \vec{J}(\vec{r}')] e^{jk\hat{r} \cdot \vec{r}'} d_{V'} = jk \int_{V'} \vec{J}(\vec{r}') \cdot \hat{r} (e^{jk\hat{r} \cdot \vec{r}'}) d_{V'} \quad (3.26)$$

Lo que conduce una nueva expresión para el compa radiado.

$$\vec{E}^r = \frac{jk}{4\pi\epsilon} \frac{e^{-jkr}}{r} \sqrt{\mu\epsilon} \int_{V'} [(\vec{J}(\vec{r}') \cdot \hat{r}) - \vec{J}(\vec{r}')] e^{jk\hat{r} \cdot \vec{r}'} d_{V'} \quad (3.27)$$

Ahora si utilizamos la propiedades de producto cruz $\hat{r} \times (\hat{r} \times \vec{J}) = \hat{r}(\hat{r} \cdot \vec{J}) - \vec{J}(\hat{r} \cdot \hat{r}) = \hat{r}(\hat{r} \cdot \vec{J}) - \vec{J}$. Entonces podemos escribir los campos radiados a grandes distancias de la siguiente manera.

$$\vec{E}^r = \frac{jw\mu}{4\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} \hat{r} \times (\hat{r} \times \int_{V'} \vec{J}(\vec{r}') e^{jk\hat{r} \cdot \vec{r}'} d_{V'}) \quad (3.28)$$

$$\vec{H}^r = \frac{jK}{4\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} \hat{r} \times \int_{V'} \vec{J}(\vec{r}') e^{jk\hat{r} \cdot \vec{r}'} d_{V'} \quad (3.29)$$

$$\vec{A}^r = \frac{\mu}{4\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} \int_{V'} \vec{J}(\vec{r}') e^{jk\hat{r} \cdot \vec{r}'} d_{V'} \quad (3.30)$$

Ahora tomando el movimiento de la señal en un entorno local, lo que significa que la propagación tiene un comportamiento de una onda plana, entonces el campo radiado se puede expresar de la siguiente manera.

$$\vec{E}^r = -\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} r' x H^r = \eta H^r x \hat{r} \quad (3.31)$$

Luego también los campos se pueden escribir en función del potencial como se muestra en las ecuaciones (3.32) y (3.33).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$\vec{E}^r = j\omega r' x(r' x \vec{A}) \quad (3.32)$$

$$\vec{H}^r = -j \frac{\omega}{R} r' \vec{A} \quad (3.33)$$

Luego como los campos E^r y H^r se “encuentran ubicados en el plano perpendicular a la dirección de propagación” se puede escribir $r' x \vec{A} = -\hat{\theta} A_\theta + \hat{\phi} A_\phi$, $r' x(r' x \vec{A}) = -\hat{\theta} A_\theta + \hat{\phi} A_\phi$ teniendo en cuenta lo anterior se pueden expresar la componente de los campos como.

$$E_r = 0, \quad E_\theta = -j\omega A_\theta, \quad E_\phi = -j\omega A_\phi \quad (3.34)$$

$$H_r = 0, \quad H_\theta = j \frac{\omega}{\eta} A_\phi = -\frac{E_\phi}{\eta}, \quad H_\phi = -j \frac{\omega}{\eta} A_\theta = \frac{E_\theta}{\eta} \quad (3.35)$$

Ahora si escribimos a \vec{A} en términos del vector de propagación \vec{N} $\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} \vec{N}$ donde es $\vec{N} = \int_{V'} \vec{J}(\vec{r}') e^{jk\hat{r}\cdot\vec{r}'} dV'$ entonces las componentes de los vectores de campo y la conservación de la energía quedan expresados.

$$E_\theta = -j\omega\mu \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} N_\phi, \quad E_\phi = -j\omega\mu \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} N_\theta \quad (3.36)$$

$$H_\theta = jk \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} N_\phi, \quad H_\phi = -jk \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} N_\theta \quad (3.37)$$

$$\vec{p} = \text{Re}[E \times H^*] = \hat{r} \frac{\eta}{4\lambda^2 r^2} [|N_\theta|^2 + |N_\phi|^2] \quad (3.38)$$

Y como estamos hablando de onda plana entonces la potencia total radiada se expresa.

$$P_r = \iint_{4\pi} \vec{p} \cdot \hat{r} ds = \frac{\eta}{4\pi} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} [|N_\theta|^2 + |N_\phi|^2] \sin\theta d\theta d\phi \quad (3.39)$$

Luego la potencia total radiada en términos de Angulo solido K queda: (Ángel Cardama Azna, 2004).

$$K = r^2 p = \frac{\eta}{4\lambda^2} [|N_\theta|^2 + |N_\phi|^2] \quad (3.40)$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.4 Polarización

Para entender cómo se polariza una onda electromagnética se retoman los conjuntos solución particulares independientes de la ecuación (3.16) $\frac{\partial^2 \vec{E}_x}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}_x}{\partial t^2}$, $\frac{\partial^2 \vec{E}_y}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}_y}{\partial t^2}$ las cuales tiene un flujo de potencial representado a través del vector $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$ en la direccione z, se presentan los campos eléctricos de las soluciones polarizados en X y en Y respectivamente, además se dice que cada solución se encuentra linealmente polarizada pues en cualquier tiempo los campos eléctricos se encuentra en una dirección específica, pero cuando juntan las dos soluciones tenemos variaciones de tiempo y fase ϕ , por lo que queda expresado la solución como.

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = R[\vec{E}(\vec{r})e^{j\omega t}] \quad (3.41)$$

Para tener una mayor visualización del comportamiento de la polarización, se escogen ondas que se propagan en la dirección de z, las cuales tiene componentes en x y y.

Ahora se tiene que los siguientes campos con polarización lineal.

$$\vec{E} = \hat{x}e^{j(\omega t - kz)} \quad (3.42)$$

$$\vec{E} = 2\hat{y}e^{j(\omega t - kz)} \quad (3.43)$$

$$\vec{E} = (\hat{x} + 0.5\hat{y})e^{j(\omega t - kz)} \quad (3.44)$$

Siendo k el número de onda $k = \sqrt{\mu\epsilon} = \frac{2\pi}{\lambda}$.

También se pueden representar campos con polarización circular de la siguiente manera.

$$\vec{E} = (\hat{x} + j\hat{y})e^{j(\omega t - kz)} \quad (3.45)$$

$$\vec{E} = (\hat{x} - j\hat{y})e^{j(\omega t - kz)} \quad (3.46)$$

Donde la ecuación (3.45) representa polarización circular a izquierda y la ecuación (3.46) representa polarización circular a derecha.

Asimismo se puede representar la polarización elíptica.

$$\vec{E} = (\hat{x} + j0.5\hat{y})e^{j(\omega t - kz)} \quad (3.47)$$

$$\vec{E} = (\hat{x} + (1 + j)\hat{y})e^{j(\omega t - kz)} \quad (3.48)$$

De lo anterior se puede decir que se produce.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Polarización lineal cuando las fases de las dos componentes ortogonales del campo eléctrico son iguales o diferentes en número π radianes.
- Polarización circular cuando las amplitudes de ambas componentes son iguales y sus fases se diferencian en $\frac{\pi}{2}$ o $\frac{3\pi}{2}$ radianes.
- Todos los demás casos posibles son polarización elíptica.

Por lo tanto cualquier onda se puede descomponer en dos polarizaciones, lineales y ortogonales, solamente con proyectar el campo eléctrico sobre los vectores unitarios orientados en una dirección. De la misma manera cualquier onda puede descomponerse en dos ondas polarizadas circularmente a izquierda o circularmente a derecha. (Ángel Cardama Azna, 2004)

3.5 Vector de Pointing y flujo de potencia

Partiendo de la idea general de que una fuente genera onda electromagnética que se propaga a través del espacio hasta llegar a un receptor, se da un transporte de energía en toda la trayectoria de la señal, entonces se presenta una relación directa entre la velocidad de transferencia de energía y las amplitudes de las intensidades de campo eléctrico y magnético de la onda electromagnética. (Robert S. Elliott, 1993)

Teniendo como punto de partida la siguiente operación vectorial.

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{E} \times \vec{H}) = \vec{H} \cdot (\vec{\nabla} \times \vec{E}) - \vec{E} \cdot (\vec{\nabla} \times \vec{H}) \quad (3.49)$$

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{E} \times \vec{H}) = -\vec{H} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} - \vec{E} \cdot \vec{J}_f \quad (3.50)$$

Ahora si tenemos en cuenta las leyes de Ampere y Faraday para medios homogéneos donde se tiene que $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$ y $\vec{B} = \mu \vec{H}$ por lo tanto (3.50) se puede expresar de la siguiente manera.

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{E} \times \vec{H}) + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \epsilon |\vec{E}|^2 + \frac{1}{2} \mu |\vec{H}|^2 \right) = -\vec{E} \cdot \vec{J}_f \quad (3.51)$$

Utilizando el teorema de la divergencia para e integrales (3.51) la podemos expresar como:

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$\oint (\vec{E} \times \vec{H}) \cdot d\vec{s} + \frac{d}{dt} \int \left(\frac{1}{2} \epsilon |\vec{E}|^2 + \frac{1}{2} \mu |\vec{H}|^2 \right) dv = \int \vec{E} \cdot \vec{J}_f dv \quad (3.52)$$

De donde se tiene que “la potencia electromagnética total que fluye con una densidad $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \frac{\text{watts}}{\text{m}^2} [\text{kg} \cdot \text{s}^{-3}]$ vector de pointing” es.

$$P_{sal} + \frac{dW}{dt} = -P_d \quad (3.53)$$

Luego tenemos que.

$$P_{sal} = \oint (\vec{E} \times \vec{H}) \cdot d\vec{s} = \oint \vec{S} \cdot d\vec{s} \quad (3.54)$$

$$W = \int \left(\frac{1}{2} \epsilon |\vec{E}|^2 + \frac{1}{2} \mu |\vec{H}|^2 \right) dv \quad (3.55)$$

$$P_d = \oint \vec{E} \cdot \vec{J}_f dv \quad (3.56)$$

Donde $P_{sal} = a$ la potencia de salida, $W =$ Energía electromagnética, $P_d =$ potencia disipada o generada. (Markus, 1983)

3.6 Amplitud

La amplitud de una onda es la distancia máxima que una partícula se puede alejar del medio en que oscila, a través de desplazamientos perpendicular partiendo de los puntos de referencia que representan la posición del equilibrio del medio. Se representa (A)

3.7 Periodo

El periodo se entiende como el tiempo transcurrido para que un punto que se propaga complete una oscilación quedando la onda en una posición equivalente a la del estado inicial de la perturbación.

El periodo también se puede entender como tiempo que requiere una señal para recorrer una distancia semejante a una longitud de onda. Se representa (T)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.8 Frecuencia

La frecuencia se entiende como el número de veces que una señal oscila en un determinado tiempo, si toma el sistema de unidades internacional la frecuencia se mide en Hertzio (Hz), donde $1\text{Hz} = \frac{1}{s}$.

La frecuencia está relacionada con el periodo mediante la expresión matemática $f = \frac{1}{T}$, que muestra que la frecuencia y el periodo son inversamente proporcionales, se representa (f)

3.9 Longitud de onda (λ)

La longitud de onda se define como “la distancia en línea recta entre dos puntos de una onda que tienen la misma posición relativa”, la longitud de onda también se puede ver como la relación de la velocidad de propagación de la onda con la frecuencia. Se representa (λ)

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad f = \frac{c}{\lambda}, \quad T = \frac{1}{f} \quad (3.57)$$

Las ecuaciones muestran las equivalencias entre: periodo, frecuencia y longitud de onda.

3.10 Espectro electromagnético

Del momento en que Maxwell logro unificar la electricidad y el magnetismo, obteniendo como resultado el electromagnetismo, se impulsó un gran avance en los conocimientos de las ondas electromagnéticas que se encuentran divididas en varios tipos. Dependiendo de su frecuencia las podemos clasificar en: rayos gamma, rayos x, radiación ultravioleta, luz visible, rayos infrarrojos, microondas y ondas de radio. Pero tiene la misma naturaleza,

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

están “constituidas por los campos E y B que oscilan en el tiempo y se propagan en el espacio.” (Schmitt, 2002)

Con las características de estas ondas electromagnéticas se ha logrado desarrollar aplicaciones importantes en todas las áreas del conocimiento.

Básicamente el espectro electromagnético es la forma como ésta divide la radiación de los cuerpos. (Schmitt, 2002)

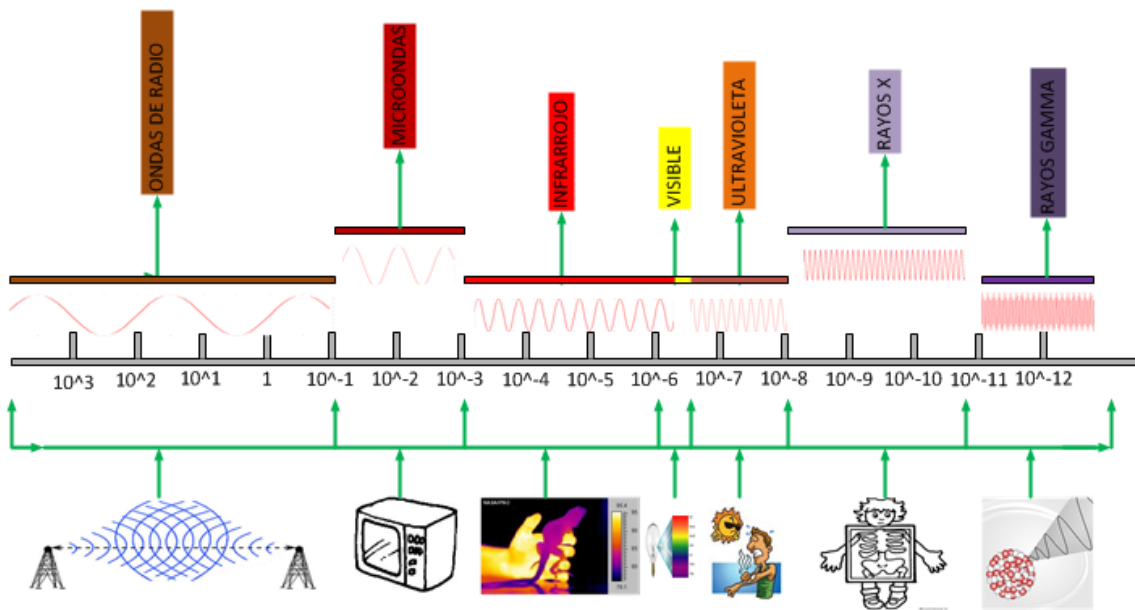


Imagen 5. Espectro Electromagnético.

3.10.1 Luz visible

Es una pequeña región del espectro electromagnético con frecuencias ubicadas entre los ($384 \times 10^{12} \text{Hz}$ y $769 \times 10^{12} \text{Hz}$) en esta zona el ojo humano puede detectar cambios en las longitudes de onda de la señales electromagnética, las cuales se pueden encontrar 400nm que se denomina como la franja del violeta hasta los 700nm que es la franja del rojo.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.10.2 Rayos infrarrojos

En esta región del espectro electromagnético se encuentran frecuencias ubicadas entre los ($3 \times 10^{11}Hz$ y $4 \times 10^{14}Hz$). Esta zona está directamente relacionada con la temperatura de los cuerpos y se encuentra subdividida en tres sub regiones, que se establecen dependiendo de la cercanía con el visible.

- **Zona próxima:** sus longitudes de onda se encuentran entre $780nm$ y $2500nm$.
- **Zona intermedia:** sus longitudes de onda se encuentran entre $2500nm$ y $50000nm$.
- **Zona lejana:** sus longitudes de onda se encuentran entre $50000nm$ y $1mm$.

3.10.3 Microondas

En esta región del espectro electromagnético se encuentran frecuencias ubicadas entre los (10^9Hz y $3 \times 10^{11}Hz$), además sus longitudes de onda se encuentran ubicadas entre ($30mm$ y $1mm$), la banda de las microondas esta comúnmente dividida en:

- **UHF** (frecuencias ultra altas), las cuales se encuentran ubicadas en ($300MHz$ y $3GHz$), y el modo de trasmisión que se da con este tipo de frecuencias es por medio de las ondas troposféricas.
- **SHF** (frecuencias súper altas) se encuentran entre ($3GHz$ y $30GHz$), esta franja es conocida como la banda centimétrica con longitudes de onda entre ($10cm$ y $1cm$), y la propagación en esta zona es por “trayectoria directa”.
- **EHF** (frecuencias extremadamente altas) se encuentran entre ($30GHz$ y $300GHz$), esta franja es conocida como la banda milimétrica con longitudes de onda entre ($10mm$),

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.10.4 Ondas de radio

Las ondas de radio fueron descubiertas por primera vez por Henrich Hertz en 1887, y se encuentran ubicadas en región del espectro electromagnético que es usada comúnmente para los procesos de transmisión y recepción de señales de comunicación. Esta zona se denomina espectro radio eléctrico que está conformado por longitudes de onda que van desde 30cm hasta varios kilómetros, además podemos encontrar frecuencias de unos pocos Hertz hasta $10^9 Hz$, esta región se encuentra dividida en varias zonas, según el modo de propagación que se explica en la Tabla 1, donde se pueden ver características importantes de cada zona en particular.

sigla	Nombre	Longitud de onda	Rango de frecuencias	Característica principal	Uso común
VLF	Frecuencia muy baja	30000m a 10000m	3KHz a 30KHz	Propagación terrestre	Enlaces de radio a grandes distancias
LF	Frecuencias bajas	10000m a 1000m	30KHz a 300KHz	Propagación terrestre	Enlaces de radio , Navegación marítima y aérea
MF	Frecuencias medias	1000m a 100m	300KHz a 3MHz	Propagación terrestre y ionosférica	Radio difusión
HF	Frecuencias Altas	100m a 10m	3MHz a 30MHz	Propagación ionosférica	Comunicaciones a mediana y larga distancia
VHF	Frecuencias muy altas	10m a 1m	30MHz a 300MHz	Propagación directa, ionosférica, o troposférica	Enlaces de radio a corta distancia
UHF	Frecuencias ultra altas	1m a 10cm	300MHz a 3GHz	Propagación directa	Enlaces directos
SHF	Frecuencias súper altas	10cm a 1cm	3GHz a 30GHz	Propagación directa	Radar, enlaces de radio

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

EHF	Frecuencias extra altas	1cm a 1mm	30GHz a 300GHz	Propagación directa	Radar, enlaces de radio
EHF	Frecuencias extra altas	1Mm a 0.1mm	303GHz a 3000GHz	Propagación directa	Radar, enlaces de radio

Tablas 1. Distribución espectro radioeléctrico. (Min Ju, 2002)

3.10.5 Rayos x

Los rayos x son radiación electromagnética con longitudes de onda comprendidas entre (0.01nm y 10nm), una de las características importantes de esta región del espectro electromagnético es que la energía es inversamente proporcional a la longitud de onda, lo que quiere decir que entre más pequeña sea la longitud de onda más grande será la energía que posee una señal.

Estos rayos se generan cuando se realiza una transición electrónica de una órbita interna de un átomo hacia una más externa.

3.10.6 Radiación ultravioleta

Esta radiación pertenece a la región del espectro electromagnético con longitudes de onda comprendidas entre 400nm y 15nm , estos rayos se extienden desde la región violeta de la zona del visible hasta llegar a los límites con los rayos x.

Este tipo de radiación es generado por las transiciones electrónicas de los átomos es las capas exteriores.

3.10.7 Rayos gamma

Una de las características importantes de este tipo de radiación electromagnética es que es de muy alta energía, con frecuencias que son mayores a $1 \times 10^{20} Hz$ y longitudes de onda menores que $3 \times 10^{-12} m$.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Este tipo de radiación es generado por las transiciones entre los estados nucleares

Electrón + positrón = pión = rayos gamma.

También se puede visualizar este tipo de radiación como una división según su energía en las siguientes zonas.

- $E_r < 30Mev$ Baja energía (LF).
- $30Mev < E_r < 30Gev$ Alta energía (HF).
- $30Gev < E_r < 30Tev$ Muy alta energía (VHF).
- $30Tev < E_r < 30Pev$ Ultra alta energía (UHF).
- $E_r > 30Pev$ Extremada alta energía (EHF).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Capítulo 4

Radiación de fuentes cósmicas y técnicas modernas de captura de señales radioeléctricas

En este capítulo se presentará las distintas formas de radiación de algunos cuerpos o elementos del cosmos partiendo de conceptos de la física teórica. Además se mostrará a modo de información una de las técnicas más moderna en la captura y recepción de señales radioeléctricas proveniente del espacio profundo.

4.1 Radiación térmica

La radiación térmica es la radiación electromagnética generada por el movimiento térmico de las partículas cargadas en la materia. Toda la materia con una temperatura mayor que el cero absoluto emite radiación térmica, compuesta por partículas que tienen energía cinética, y que interactúan entre sí. Estos átomos y moléculas están compuestos de partículas cargadas, es decir, los protones y los electrones y las interacciones cinéticas entre las partículas de materia resultado a cargo de aceleración y dipolo-oscilación. Esto da como resultado la generación electrodinámica de campos eléctricos y magnéticos acoplados, lo que resulta en la emisión de fotones, radiación de energía fuera del cuerpo a través de su límite de la superficie. La radiación electromagnética, o luz, no requiere de la presencia de materia para propagar y viajar en el vacío del espacio infinitamente lejos si obstrucciones.

Las características de la radiación térmica dependen de varias propiedades de la superficie de la que está emanando, incluyendo su temperatura, su capacidad de absorción espectral y la potencia de emisión espectral, tal como se expresa por la ley de Kirchhoff definida por la siguiente ecuación $\vec{E}(T) = \epsilon \vec{E}_b(T) = \alpha \vec{E}_b(T_S)$ donde $\vec{E}_b(T_S) =$ Señal recibida , $\alpha \vec{E}_b(T_S) =$ lo se acerve , $\epsilon \vec{E}_b(T_S) =$ lo que emite .

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

La radiación térmica no es monocromática, es decir, que no consiste sólo de una sola frecuencia, pero comprende una dispersión continua de las energías de los fotones, su espectro característico.

La luz solar es la radiación térmica generada por el plasma caliente del sol. La Tierra también emite radiación térmica, pero a una intensidad mucho menor y a una diferente distribución espectral, ya que es más frío. La absorción de la Tierra de la radiación solar, seguida de su radiación térmica saliente son los dos procesos más importantes que determinan la temperatura y el clima de la Tierra.

4.1.1 Propiedades de la Radiación térmica

Existen cuatro particularidades principales que caracterizan a la radiación térmica.

- 1) La radiación térmica emitida por un cuerpo a cualquier temperatura se compone de una amplia gama de frecuencias. La distribución de frecuencia está dada por la ley de Planck de la radiación del cuerpo negro de un emisor idealizada. Esto se muestra en el literal 4.2.
- 2) El rango de frecuencia dominante de la radiación emitida se desplaza hacia frecuencias más altas como la temperatura de los aumentos de emisor. Por ejemplo, un objeto caliente en el rojo irradia principalmente en las largas longitudes de onda de la banda visible. Si se calienta más, también comienza a emitir cantidades perceptibles de luz verde y azul hasta que aparecen de color blanco para el ojo humano. Sin embargo, incluso a una temperatura al rojo vivo de 2000 K, 99% de la energía de la radiación se encuentra todavía en el infrarrojo. Esto se determina por la ley del desplazamiento de Wien representado en la ecuación (4.8).
- 3) La cantidad total de radiación de todas las frecuencias aumenta abruptamente cuando la temperatura se eleva, sino que crece como T^4 , donde T es la temperatura absoluta del cuerpo. Un objeto en la temperatura de un horno de cocina, alrededor de dos veces la temperatura ambiente en la escala de temperatura absoluta irradia 16 veces más energía por unidad de área. Un objeto en la temperatura del filamento de una bombilla,

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

aproximadamente 3.000 K incandescente, o 10 horas a temperatura ambiente, irradia 10.000 veces más energía por unidad de área. La intensidad de la radiación total de un cuerpo negro se eleva como la cuarta potencia de la temperatura absoluta, tal como se expresa por la ley de Stefan-Boltzmann. Representada en la ecuación (4.7).

4) La tasa de la radiación electromagnética emitida a una frecuencia dada es proporcional a la cantidad de absorción que experimentaría por la fuente. Por lo tanto, una superficie que absorbe más luz roja térmicamente irradia más luz roja. Este principio se aplica a todas las propiedades de la onda, incluyendo la longitud de onda, la dirección, la polarización, e incluso la coherencia, por lo que es muy posible tener la radiación térmica que es polarizada, coherente, y direccional, aunque las formas polarizadas y coherentes son bastante raras en la naturaleza lejos de fuentes. (Kraus, 1966)

4.2 Radiación de cuerpo negro

Partiendo del concepto de energía en el instante que se emite radiación electromagnética expresada de la forma $\vec{E} = \hbar\nu$ donde ($\hbar = 6.626 \times 10^{-27}$ ergis * s. Que representa la constante de Planck), además de esto si entendemos la energía como “fotones” lo cual tiene una temperatura T en un volumen v, entonces podemos escribir el estado j que representa “número promedio de fotones” de la siguiente manera.

$$\bar{n}_j = \frac{1}{e^{E_j/kT} - 1} \quad (4.1)$$

Además como j tiene una frecuencia que está dada por $\frac{w_j}{2\pi}$ con $w_j = \pi c \left\langle \left(\frac{n}{L_x} \right)^2 + \left(\frac{m}{L_y} \right)^2 + \left(\frac{l}{L_z} \right)^2 \right\rangle$ y además entendiendo que un fotón que tiene una frecuencia $\frac{w}{2\pi}$ posee una energía representada por la siguiente expresión $\hbar w_j = \epsilon_j$ entonces podemos escribir la ecuación (4.1) de la siguiente manera.

$$\bar{n}_j = \frac{1}{e^{\hbar w_j/kT} - 1} \quad (4.2)$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Luego como en este fenómeno no solo tenemos una onda estacionaria sino varias se pueden representar los estados del fotón con un diferencial $dN = \frac{w^2 v}{\pi^2 c^3} dw$ que va desde las frecuencias $\frac{w}{2\pi}$ hasta $w + \frac{dw}{2\pi}$ con lo que podemos reescribir la ecuación (4.2) de la siguiente manera.

$$d\bar{n} = \frac{v}{\pi^2 c^3} \frac{w^2 dw}{e^{\hbar w / kT} - 1} \quad (4.3)$$

Debido a que la “densidad de energía promedio en cada intervalo dw es” $du = \hbar w \frac{d\bar{n}}{v}$ por lo tanto podemos escribir la energía por unidad de volumen de acuerdo con la expresión siguiente.

$$U(w)dw = \frac{\hbar w^3}{\pi^2 c^3} \frac{dw}{e^{\hbar w / kT} - 1} \quad (4.4)$$

Luego para saber la energía que atraviesa una superficie S la cual se encuentra encerrada en un volumen en un tiempo, que es la ecuación para brillo.

$$B(v, T) = \frac{C}{4\pi} u(v) \quad (4.5)$$

Seguidamente podemos expresar la radiación de cuerpo negro o ley de Planck de la siguiente manera.

$$B(v, T) = \frac{2\hbar V^3}{c^2} \frac{dw}{e^{\hbar v / kT} - 1} \quad (4.6)$$

La ley de Planck muestra la intensidad con respecto de la longitud de onda de un cuerpo negro, y se puede observar que a medida que un cuerpo se calienta se ve más brillante puesto que está emitiendo más radiación, siguiendo con este razonamiento podemos decir que la longitudes de onda cambian con la temperatura, por ejemplo un “cuerpo frio emite longitudes de onda más largas que un cuerpo caliente.” (Morse P.M, 1978) (José Antonio García Barreto, 2015) .

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Con la ley de Stefan-Boltzmann nos presenta la “radiación térmica con una potencia emisiva hemisférica total” expresada como. (Incropera F. P. y DeWitt, 1999)

$$\vec{E} = \sigma T^4 \quad (4.7)$$

Con $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Nm}^{-1} \text{ seg}^{-1} \text{ k}^{-4}$

Y la ley de Wien hace una relaciona entre la “longitud de onda máxima con la temperatura del Cuerpo Negro” (Arturo R. Castaño, 2015)

$$\lambda_{max} T = cte \quad (4.8)$$

4.3 Radiación sincrotrón

La radiación sincrotrón se presenta cuando partículas libres cagadas que se mueven en cualquier dirección con velocidades cercanas a la de la luz, interactúan con campos magnéticos, generándose radiaciones discretas o de línea (radiación sincrotrón) que ha permitido a los radio astrónomos cuantizar las energía para las frecuencias no térmicas de las partículas que se mueven a través de los campos galácticos, lo que han permitido identificar objetos como los cuásares. (Eugene Hecht, 2000)

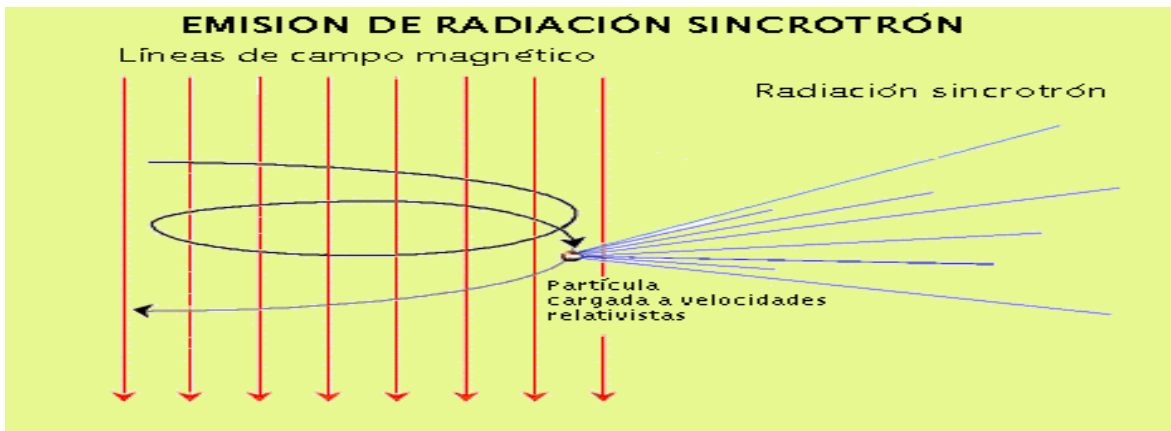


Imagen 6. Emisiones de radiación sincrotrón. (Laboratorio de Astrofísica Espacial y Física Fundamental. LAEFF, 2015)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En la (Imagen 7) se puede apreciar la formación de línea en 21cm que corresponde al hidrogeno neutro. Su formación se presenta cuando un átomo de hidrogeno excitado gana energía lo que le permite al protón y al electrón alinear las direcciones de giro, posteriormente si el átomo regresa a un estado de reposo donde el protón y el electrón giran en direcciones opuestas, de este proceso se desprende un fotón que tiene exactamente una longitud de onda de 21cm y una frecuencia de 1428MHz que corresponde al hidrogeno neutro. (alejandro Gutiérrez, 2004)

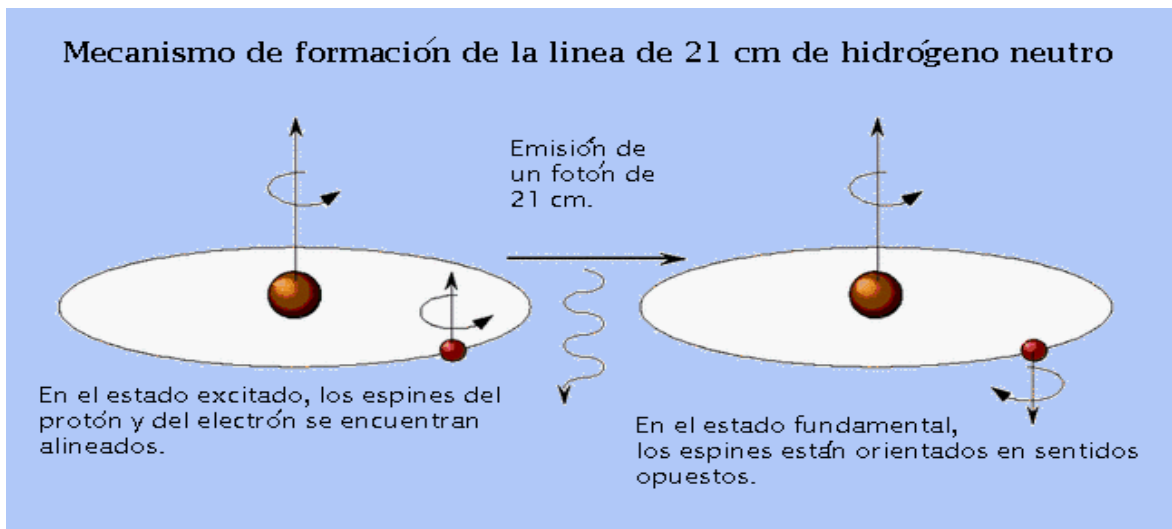


Imagen 7. Formación de línea de 21cm de hidrogeno neutro. (Laboratorio de Astrofísica Espacial y Física Fundamental. LAEFF, 2015)

4.4 Interferometría

Debido a que las señales radioastronómicas tienen una potencia muy pequeña, se necesitan antenas muy grandes para poder captarlas con cierta resolución lo que no es muy adecuado en cuanto costo beneficio. Por esto es que las técnicas modernas de recepción de señales mejoran la resolución de las imágenes al utilizar interferometría, que es una técnica que aprovecha la propiedad de sumar señales para obtener la resolución de varias antenas

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

unidas, las cuales simulan una antena cuyo diámetro es la distancia entre las separaciones del arreglo de antenas.

Con esta técnica se pueden realizar observaciones del espacio más detalladas debido a que son varios receptores tomando datos de una misma fuente, además un arreglo de varias antenas pueden simular una de mayor tamaño para obtener mejor información.

Existen principalmente dos casos de interferencia entre señales de radiofrecuencia, interferometría constructiva e interferometría destructiva.

4.4.1 Interferencia constructiva

Este tipo de interferencia es la que se utiliza en los arreglos de antenas dispuestos para la radioastronomía actualmente, esto consiste en tener varias señales con igual longitud de onda (λ), además las crestas y los valles de estas también coinciden, con lo que se puede afirmar que las señales se encuentran en fase, lo que quiere decir que si tomas dos señales de estas y las sumamos el resultado que obtenemos es la suma de las amplitudes individuales, como se puede apreciar en la (Imagen 8). (Pessoa Jr O, 1997).

La interferencia constructiva se puede ver representada mediante la ecuación por tramos.

$$\left. \begin{array}{l} d = n\lambda \\ \text{sen}\theta = \frac{d}{D} \end{array} \right\} \rightarrow \text{sen}\theta = \frac{n\lambda}{D} \quad (4.1)$$

D= Es la distancia entre las antenas.

d=Es la distancia de la proyección del frente de onda de una antena con respecto a la otra.

Ahora si se tiene un sistema de interferencia construido con más de dos antenas entonces se tiene la ecuación para el campo.

$$\vec{E}(\varnothing) = \vec{E}_0(\varnothing) \frac{\text{sen}\left(\frac{n\psi}{2}\right)}{\text{sen}\left(\frac{\psi}{2}\right)} \quad (4.2)$$

$$\psi = 2\pi d_\lambda \text{sen}(\varnothing).$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

d_λ = espacio entre las antenas en términos de λ .

\emptyset = Angulo desde la perpendicular a la línea.

n = número de elementos.

Para realizar muestreo de cuerpos del espacio estelar es necesario tener una buena resolución angular la cual se mejora mucho utilizando varios receptores a través de las técnicas de interferometría constructiva, donde la señal depende de la superficie de recolección formada por la unión de todos los elementos. Con lo que se permite expresar la función de visibilidad de la distribución de intensidad se puede expresar como muestra la ecuación. (Rodriguez, 2008)

$$V(u, v, w)e^{-i2\pi w} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A(x, y)I(x, y)e^{i2\pi(ux+uy)} dx dy \quad (4.3)$$

$A(x, y)$ = forma del haz.

$I(x, y)$ = mapa de intensidad.

(u, v) = plano perpendicular al plano del objeto.

u Paralelo al plano E, v apunta a N, w dirección de apuntamiento.

Si tenemos emisiones de fuentes pequeñas se puede ver a V independientemente de w y utilizando la transformada inversa de Fourier se puede obtener el mapa de intensidad del objeto dependiendo del haz. (Jaime Zamorano, 2009)

$$I'(x, y) = A(x, y)I(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} V(u, v, 0)e^{-i2\pi(ux+uy)} dudv \quad (4.4)$$

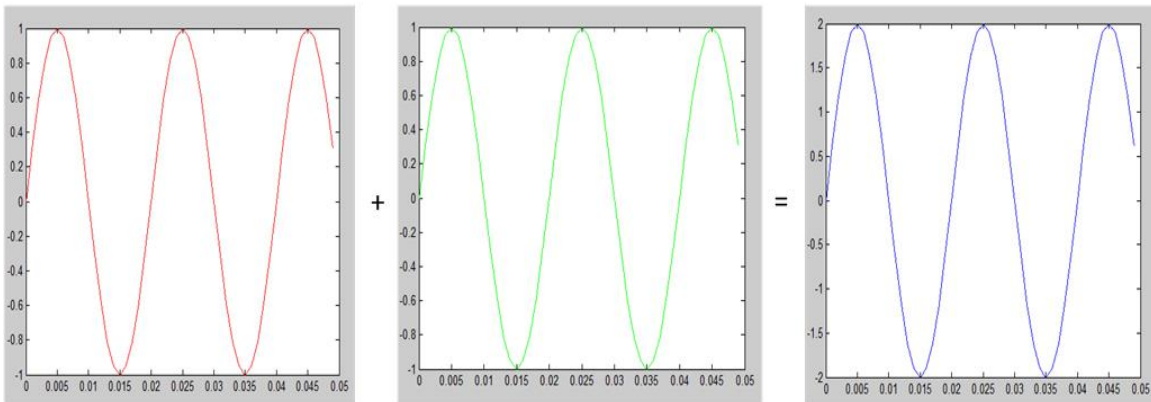


Imagen 8. Interferencia constructiva.

4.4.2 Interferencia destructiva

Este tipo de interferencia se presenta cuando la cresta de una señal coincide con el valle de otra, lo que quiere decir que una señal está desfasada ($\lambda/2$) con respecto de la otra, y el resultado al sumar este par de señales es la anulación total de las dos señales, como se muestra en la (Imagen 9). (Gustavo Rodríguez, 2015)

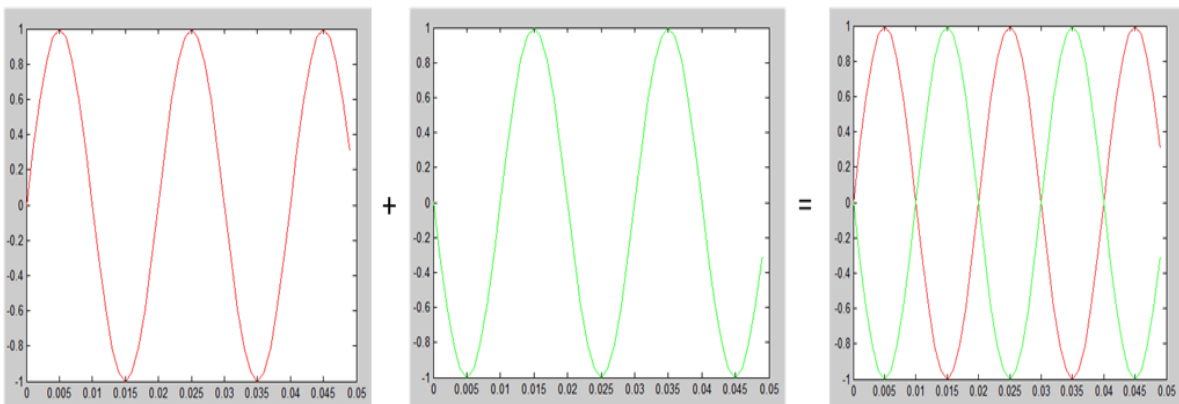


Imagen 9. Interferencia destructiva.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Capítulo 5

Diseño de esquema para la adquisición de señal en la frecuencia de 1420MHz (hidrógeno neutro)

En este capítulo se presentará el diseño y la simulación de la antena que se va a utilizar para realizar adquisición de señal en la frecuencia de 1420MHz (hidrógeno neutro), las características del plato parabólico para la antena, y las especificaciones técnicas de los demás dispositivos empleados en las etapas del radio telescopio, además se realizará el análisis físico en el proceso de captura de señales.

5.1 Radiación electromagnética proveniente del espacio

Si se toma la radiación electromagnética que viene del espacio en forma de onda la cual incide sobre la superficie de la tierra con las características de onda plana, entonces se puede escribir la potencia incidente de esta señal como producto de la intensidad en la posición del ángulo sólido con el coseno del ángulo cenital.

$$dw = B \cos(\theta) d\Omega dA dv \quad (5.1)$$

dw = potencia incidente.

B = intensidad en la potencia de $d\Omega$.

$d\Omega$ = ángulo sólido infinitesimal.

θ = distancia cenital.

dA = superficie infinitesimal.

dv = intervalo de frecuencias.

Como la intensidad que se obtiene en la tierra de estas señales provenientes del espacio varía su dirección en función del ángulo, entonces se puede escribir la potencia incidente de la ecuación (5.1) como. (Robert Estalella. Guillen Anglada, 1997)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$W = A \iint_{\Omega} B(\theta, \phi) \cos(\theta) d\Omega \quad (5.2)$$

5.2 Ángulo sólido

Se conoce como ángulo sólido a la sección tridimensional que se formado en el vértice de un cono inscrito en una esfera de radio r , donde se cumple que $R^2 = r$, en el caso de las antenas si este ángulo fuera constante, toda la potencia de radiación saldría por esa zona efectiva del ángulo.

$$\Omega_A = \iint_{4\pi} P_n(\theta, \phi) d\Omega \quad (5.3)$$

$$d\Omega = \text{sen}(\theta) d\theta d\phi \quad (5.4)$$

$$P_n(\theta, \phi) = \frac{P(\theta, \phi)}{P_{\max}(\theta, \phi)} \quad (5.5)$$

5.2.1 Ángulo sólido del haz principal

$$\Omega_M = \iint_{\text{lob. pp}} P_n(\theta, \phi) d\Omega \quad (5.6)$$

$$\Omega_m = \Omega_A - \Omega_M \text{ con } \varepsilon_M = \frac{\Omega_M}{\Omega_A} \quad (5.7)$$

Ω_M = ángulo sólido del haz principal.

Ω_m = ángulo sólido de los lóbulos menores.

ε_M = eficiencia del haz.

5.3 Antena receptora (bocina cilíndrica)

Teniendo como punto de partida el modelo de transmisión en una guía de onda cilíndrica (TE₁₁) el cual especifica el diámetro mínimo que puede tener la guía. (Dean E. Pershing, JUNE 2004)

$$\lambda_{TE11} = \lambda = 1.706 D_b \quad (5.8)$$

$$D_{b \min} = \frac{1}{1.706} \lambda \quad (5.9)$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

λ_c = longitud de onda de corte se por (TE11).

$D_{b \min}$ = diámetro mínimo de la guía de onda.

λ = longitud de onda de trabajo.

5.3.1 Alimentación del receptor

Para conseguir la máxima eficiencia de una antena parabólica es necesario tener el control exacto de varias variables como, la amplitud, fase y polarización del campo incidente sobre el reflector, por lo que se tiene que cumplir condiciones exactas de alimentador, el alimentador es una antena direccional orientada con la máxima radiación en dirección al vértice del paraboloide.

Este debe ser pequeño y que produzca un frente de onda esférico, lo que quiere decir que la energía es radiada como fuente puntiforme, la amplitud del haz radiado por el alimentador debe tener un ángulo grande para iluminar adecuadamente el área del reflector y el campo deben tener la polarización adecuada.

La fase del campo radiado por una antena depende de la longitud eléctrica entre la antena y el punto de observación.

La dirección de propagación de la energía transportada por la onda es perpendicular a las superficies de fase constante. Conocida como superficie esquifase, se puede inferir la dirección de destino de la onda y la dirección de la fuente. (Balanis, 1982)

La antena bocina circular estar alimentada a través de un conector tipo N, al cual se le soldara un monopolo que ira dentro de la guía de onda ubicado a una distancia del fondo de $\frac{\lambda_g}{4}$ y con una longitud de $\frac{\lambda}{4}$, siendo λ_g la longitud de onda que se propaga dentro de la guía de onda, Según el modo de propagación (TE11).

Para encontrar λ_g realiza el siguiente análisis partiendo de concepto de numero de onda y la interacción de las señales dentro de la guía de onda. (Moreno, 2015)

$$k_g^2 = k^2 - k_c^2 \quad (5.10)$$

k_g = número de onda que se propaga en la guía.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

k = número de onda de la señal de trabajo.

k_c = número de onda de la señal de corte.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad k_c = \frac{2\pi}{\lambda_c} \quad (5.11)$$

Ahora si se reemplaza la ecuación (5.11) en la (5.10) se tiene

$$k_g^2 = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 - \left(\frac{2\pi}{\lambda_c}\right)^2 \quad (5.12)$$

Luego operando algebraicamente la ecuación (19) queda expresada

$$\frac{1}{\lambda_g} = \sqrt{\frac{1}{\lambda^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}} \rightarrow \lambda_g = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\lambda^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}}} \quad (5.13)$$

Si tenemos en cuenta que $\lambda = \frac{c}{f}$ entonces λ_g la podemos reescribir como una función de frecuencias.

$$\lambda_g = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\left(\frac{c}{f}\right)^2} - \frac{1}{\left(\frac{c}{f_c}\right)^2}}} \rightarrow \lambda_g = \frac{1}{\sqrt{\frac{c^2}{(f)^2} - \frac{c^2}{(f_c)^2}}} \quad (5.14)$$

$$k_g = \sqrt{\left(\frac{2\pi f}{c}\right)^2 - \left(\frac{2\pi f_c}{c}\right)^2} \rightarrow k_g = \frac{1}{c} \sqrt{(2\pi f)^2 - (2\pi f_c)^2} \quad (5.15)$$

La ecuación (5.15) muestra cuando se puede tener propagación.

Si $f < f_c \rightarrow k_g \in c \rightarrow$ *no existe la propagación.*

Si $f = f_c \rightarrow k_g = 0 \rightarrow$ *umbral de propagación.*

Si $f > f_c \rightarrow k_g \in R$ *hay propagación.*

5.3.2 Diseño de alimentación utilizando un monopolo de $\frac{\lambda}{4}$

Como ya se había mencionado, la guía de onda se va a alimentar a través de un conector tipo N al cual se le conectará un monopolo diseñado para la frecuencia de 1420MHz o

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$\frac{\lambda}{4}$, este elemento radiante se colocara se colocara dentro de la bocina circular y es el encargado de excitar el modelo TE11.

Las medidas de diseño y operación del monopolo se especifican en la siguiente tabla. (Adrián Juan Heredia, 2015)

Diámetro del monopolo	0.00015 (m)
Frecuencia	1420MHz
Longitud del monopolo	$L = \frac{\lambda}{4} = 0.05281$ (m)

Tablas 2. Medidas físicas de la antena monopolo.

En la Imagen 10 se muestra el diseño en FEKO del monopolo de $L = \frac{\lambda}{4}$ para la frecuencia de 1420MHz, con polarización en el eje x, con un plano tierra de diámetro igual a la longitud del monopolo y una alimentación de dipolo eléctrico con el que se permite generar los diferentes características del el elemento radiador.

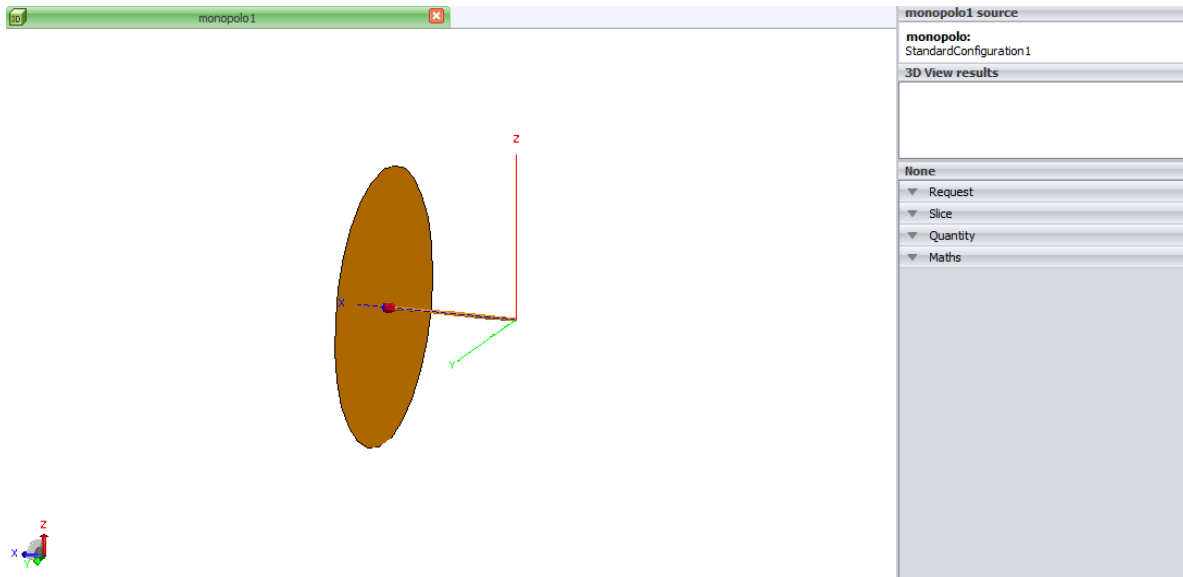


Imagen 10. Monopolo de $\lambda/4$ para la frecuencia 1420MHz.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En la Imagen 11 se presenta el diagrama de radiación del monopolo en forma tridimensional con longitud de onda de 21cm que corresponde a l frecuencia de 1420Mhz, los niveles son expresados en decibelios con respecto al máximo de radiación. Esta antena es linealmente polarizada en el eje x que contiene. Además se tiene la figura tipo toroide con simetría de revolución igual al patrón de radiación de una antena tipo dipolo con distribución de corriente sinusoidal.

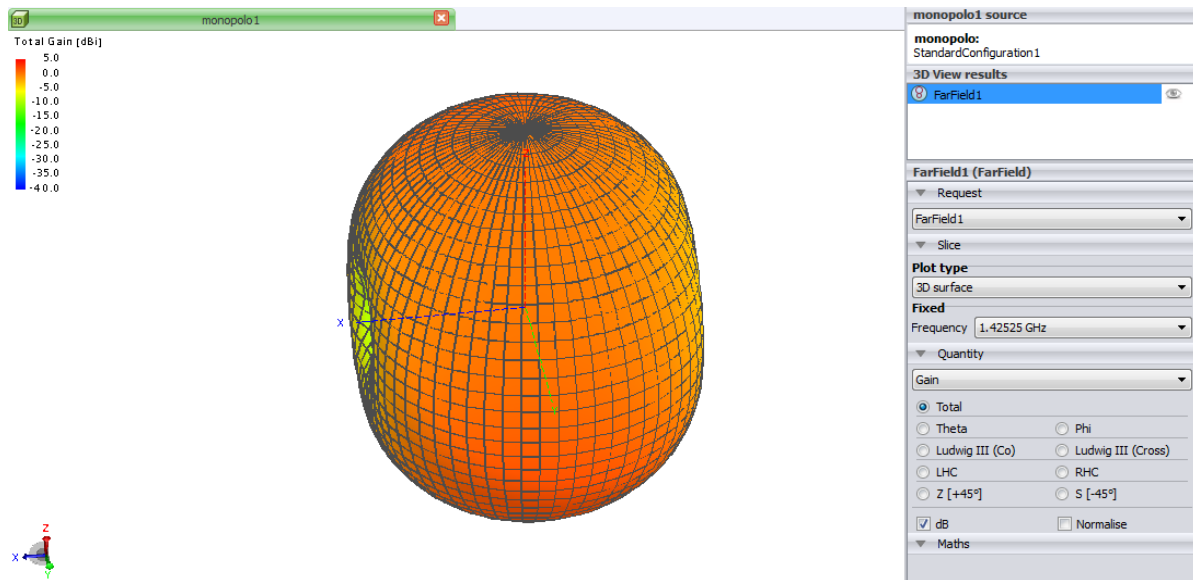


Imagen 11. Patrón de radiación tridimensional del monopolo.

Se puede observar en la Imagen 12 el patrón de radiación en 3D del monopolo con un cote transversal donde se puede reconocer visualmente las direcciones donde está ubicada las mayor y menores concentraciones de radiación de la antena.

Se tiene que en la dirección donde el radio del toroide es mayor se encuentran la máxima radiación zona representada por el color rojo el cual le corresponde 5 dBi y la dirección donde se tiene el radio menor del toroide la corresponde el color azul que representa la zona de menor radiación con -40 dBi.

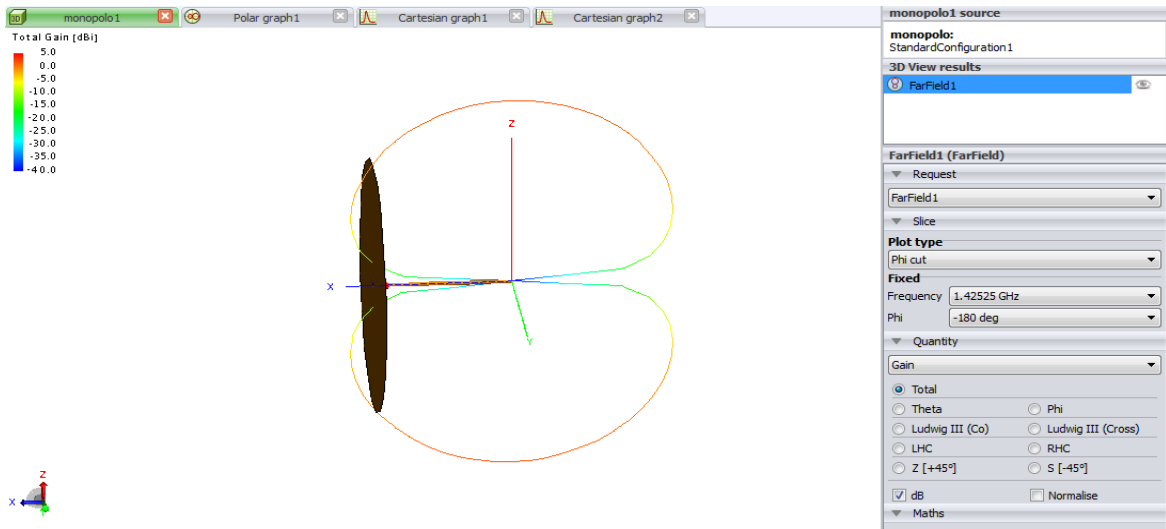


Imagen 12. Corte trasversal del patrón de radiación del monopolo.

Los cortes bidimensionales del diagrama de radiación lo podemos ver en la Imagen 13 que es la representación del patrón de radiación en coordenadas polares, donde los ángulos representan la dirección del espacio y el radio representa la intensidad del campo eléctrico o la intensidad de potencia radiada para la antena monopolo diseñada que es de 1.4 (dB), además presenta la información de distribución de potencia en las diferentes direcciones del espacio.

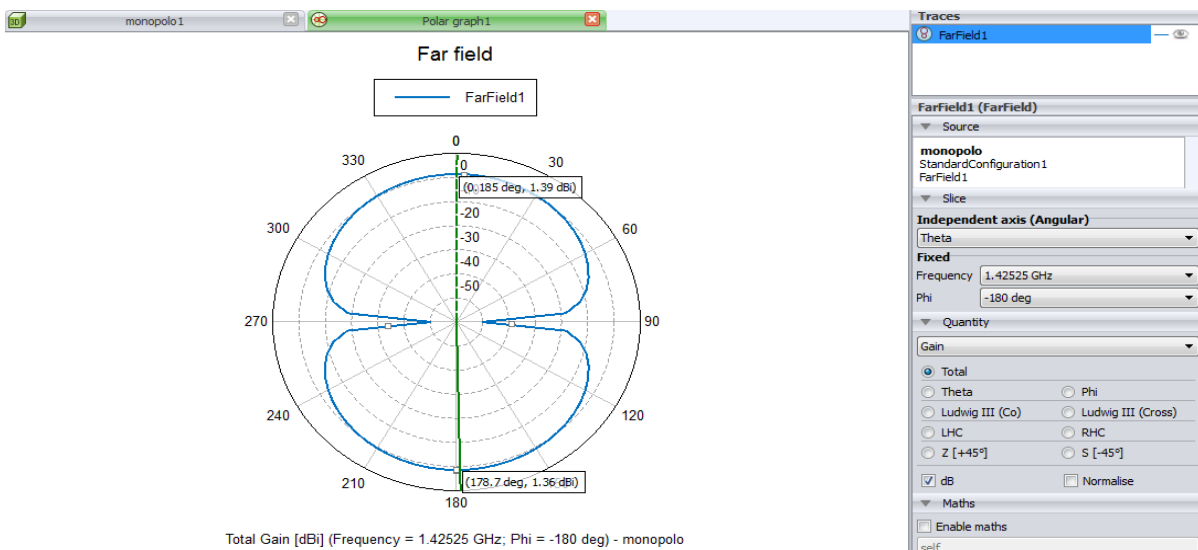


Imagen 13. Patrón de radiación en coordenadas polares del monopolo.

La representación en coordenadas cartesianas expuesto en la Imagen 14 permite observar directividad en la antena monopolo.

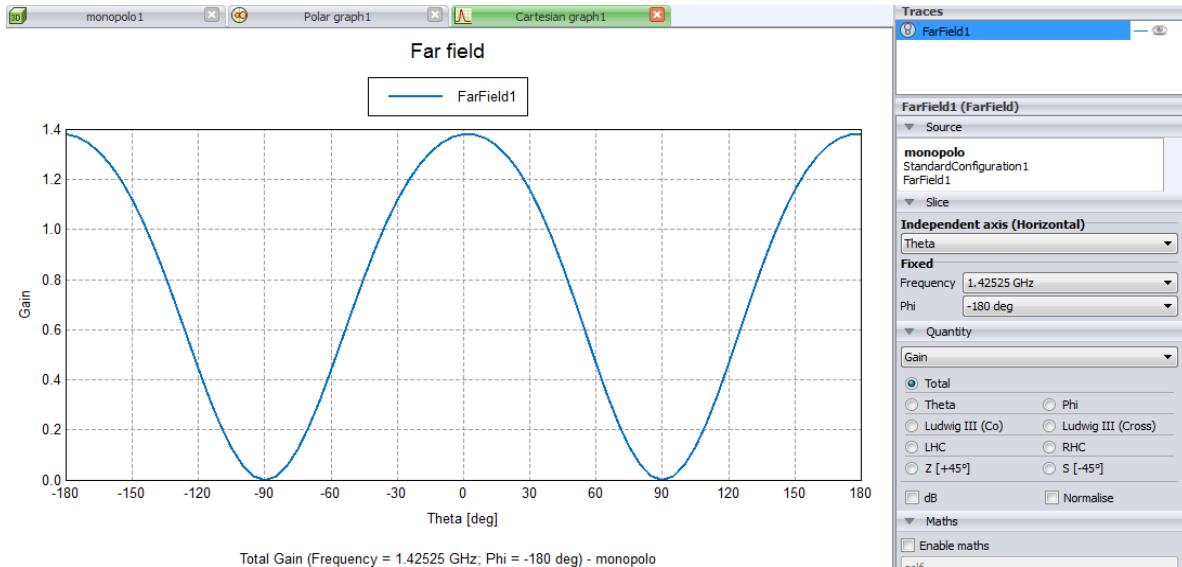


Imagen 14. Patrón de radiación en coordenadas polares del monopolo.

En la (imagen 15) se puede observar la relación que se presente entre la suma de voltaje incidente (V^i) con voltaje reflejado (V^r), dividido la diferencia de estos voltajes, que se presentan en la antena monopolo.

La relación VSWR se representa mediante la ecuación. $VSWR = \frac{V^i + V^r}{V^i - V^r} = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma}$

En el diseño del antena monopolo FEKO arroja un $VSWR = -28dB$ para la frecuencia de 14222MHz, que es bueno para el diseño.

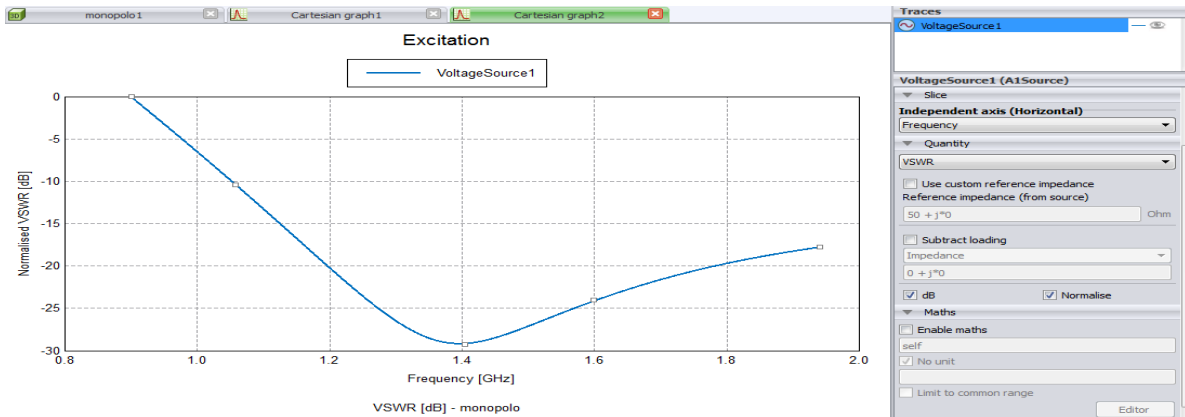


Imagen 15. Parámetro VSWR.

El coeficiente de reflexión expuesto en la (Imagen 16) indica la relación de onda estacionaria con respecto a un voltaje VSWR, o también se puede ver como el valor absoluto de la diferencia, de la impedancia de entrada de la antena con la impedancia característica de la línea de transmisión, dividido su suma.

$$\Gamma = \frac{V^r}{V^i} = \frac{|z_{in} - z_0|}{z_{in} + z_0}$$

En el diseño de la antena monopolo FEKO arroja un coeficiente de reflexión $\Gamma = -8dB$ para la frecuencia de 1422MHz, lo que es bueno para el diseño ya que se tiene un voltaje reflejado peño y se puede controlar fácilmente.

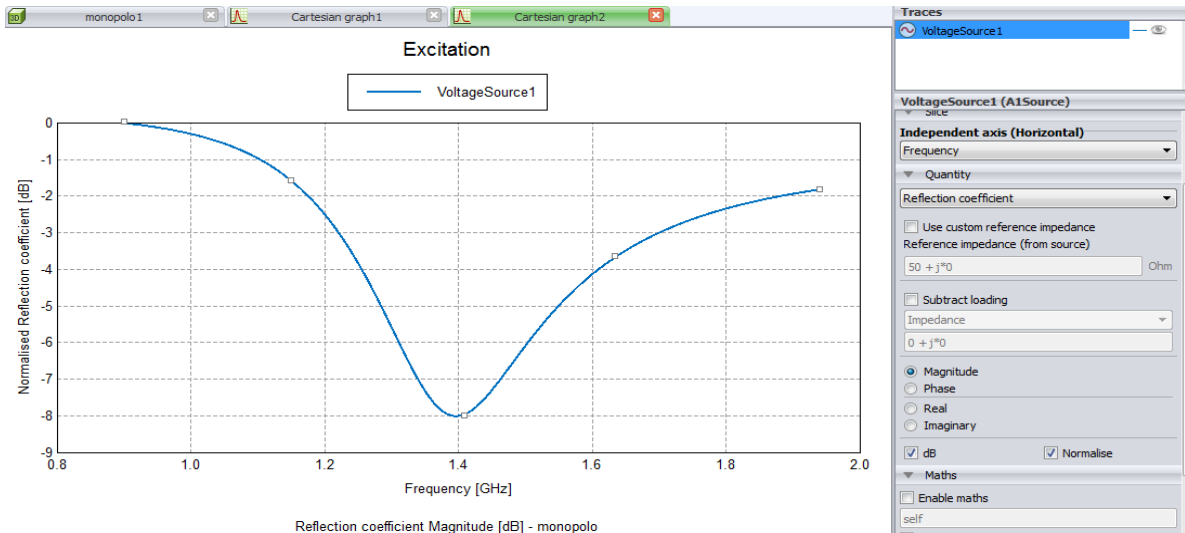


Imagen 16. Coeficiente de reflexión.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Los parámetros S permiten realizar un análisis detallado de la operación de la antena. Por ejemplo en la Imagen 17 se aprecia la evolución del parámetro S11, donde se realiza un barrido en frecuencia desde 900Mhz hasta 2Ghz con lo que se muestra la adaptación de la antena para la frecuencia de operación de 1420MHz. Y miremos que aproximadamente en esta frecuencia se produce el mínimo valor por lo tanto la antena monopolo presenta resonancia adecuada para el modelo simulado.

El parámetro S11 se representa mediante la ecuación. $S_{11} = \frac{b_1}{a_1} |_{a_2=0}$ Donde se tiene que, $a_1 = \frac{1}{2\sqrt{z_0}} (V_l + z_{oil})$ Y $b_1 = \frac{1}{2\sqrt{z_0}} (V_l - z_{oil})$.

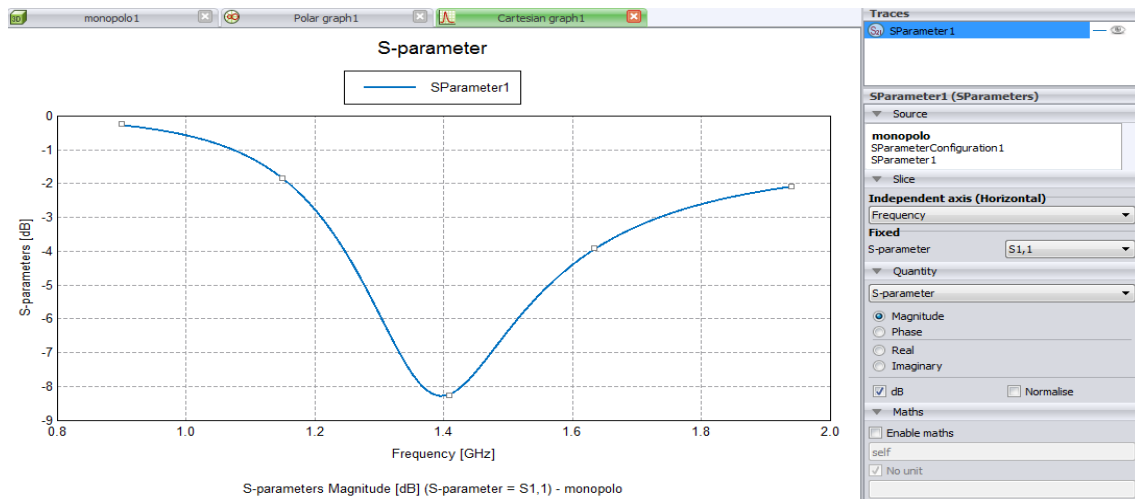


Imagen 17. Parámetro S11.

Para establecer la pureza de polarización en la antena, se utilizara la relación de los campos radiados, se toman los módulos del campo máximo radiado en la polarización los cuales se representan mediante la relación axial.

Esta relación axial toma teóricamente valores entre 1 e infinito. Donde la polarización circular toma valores iguales a uno y la polarización lineal tomo valores en el infinito. Esto se puede representar mediante la ecuación $AR = \left| \frac{|\vec{E}_{AHC}| + |\vec{E}_{LHC}|}{|\vec{E}_{AHC}| - |\vec{E}_{LHC}|} \right|$

$$AR = \left| \frac{|\vec{E}_{AHC}| + |\vec{E}_{LHC}|}{|\vec{E}_{AHC}| - |\vec{E}_{LHC}|} \right|$$

En la (imagen 18) se puede aprecia los niveles de contrapolar arrojados por FEKO los cuales se definen como la relación entre la componente a izquierdas y la componente a derechas de

polarización, resultando que se representa por colores desde el azul al rojo y con valores para la antena desde (-75 a -30) dB.

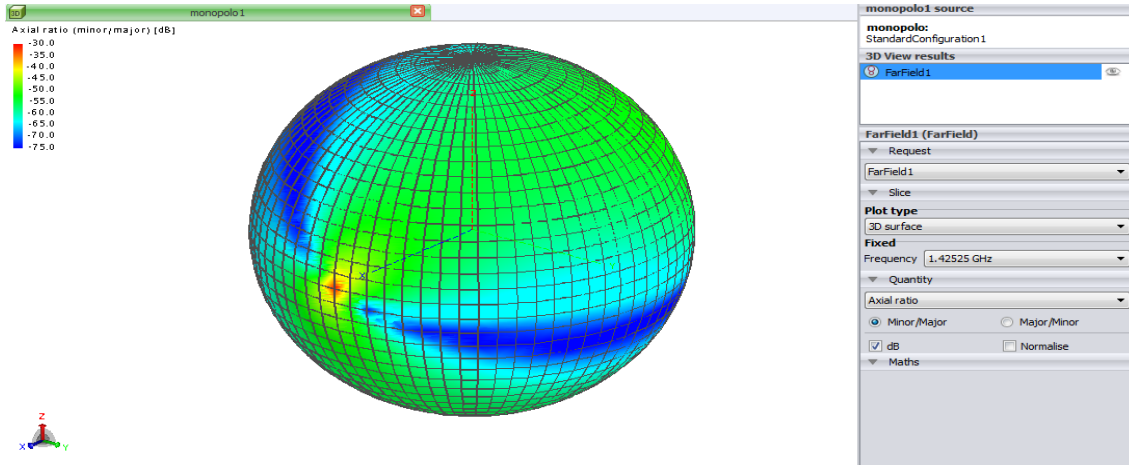


Imagen 18. Relación axial.

En la Imagen 19 se muestra la descomponían de polarización en las componentes circulares ortogonales entre sí. Además se aprecia la circunferencia de mayor radio que corresponde a la componente contrapolar, que tiene valores máximos y mínimos representados por colores del azul al rojo, con valores que oscilan entre (-60 a -30) dB

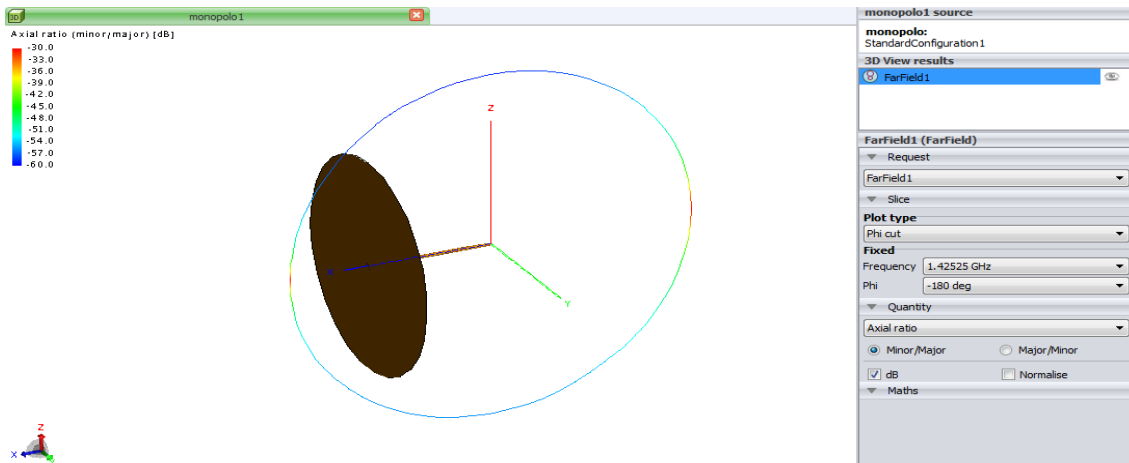


Imagen 19. Relación axial descomposición de polarización.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5.3.3 Diseño de bocina circular con alimentación de guía de onda

Se realizara el diseño de la bocina utilizando alimentación de guía de onda, con el objetivo analizar el compartimento de algunos parámetros importantes en la antena, como la forma de su patrón de radiación en diferentes coordenadas y la polarización.

En este diseño se utilizara el software de simulación FEKO que permitirá obtener resultados de la antena como, ganancia, directividad, coeficiente de reflexión, etc. Además se tendrá ecuación la ecuación (5.8) y (5.9) que nos dan el diámetro de la bocina en función de la longitud de onda λ correspondiente a la frecuencia de trabajo 1420MHz (frecuencia del hidrógeno neutro).

Todas las medidas físicas necesarias para este diseño de bocina están especificadas en la siguiente tabla.

Diámetro de la guía de onda	0.68λ	0.1411 (m)
Longitud de la guía de onda	$0.68\lambda_g$	0.2934 (m)
Posición del anilla de bloqueo para la gua de onda	0.15λ	0.0316 (m)
Radio del anillo de bloqueo para la gua de onda	0.62λ	0.1266 (m)
Profundidad del anilla de bloqueo para la gua de onda	0.45λ	0.0949 (m)

Tablas 3. *Medidas físicas de la antena bocina circular.*

En la imagen 20, Podemos ver el modelo en tres dimensiones de la antena bocina circular alimentada con excitación de guía de onda. Para este diseño se utilizó el software simulación FEKO y las medidas físicas de la tabla 3.

El desarrollo de esta antena se realizó con el fin analizar el comportamiento y la evolución de algunos parámetros importantes, como el patrón de radiación tanto tridimensional como en coordenadas cartesianas y polares, además de ver como se comparta la relación axial en una antena bocina.

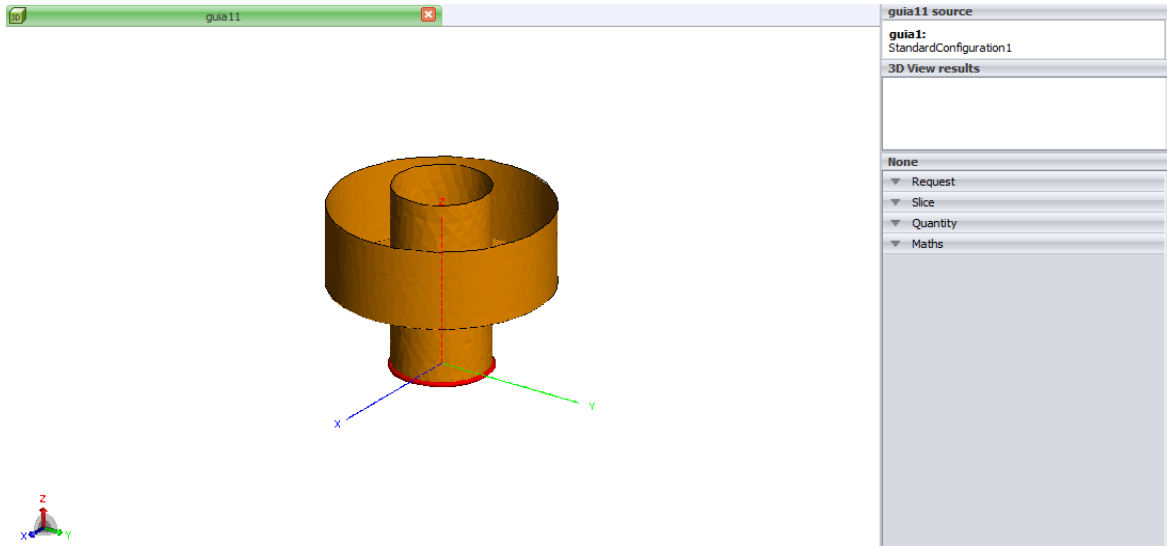


Imagen 20. Entena bocina circular para la frecuencia 1420MHz.

El patrón de radiación tridimensional de la Imagen 21 es el de la antena bocina circular con excitación de guía de onda, se puede ver franjas marcadas con diferentes colores que representan la directividad, esta zona se extiende de color azul, siendo este la representación de la menor directividad con -24dBi, hasta el color rojo con 8dBi, que representa la mayor directividad en este modelo de antena bocina circular para la frecuencia de 1420MHz. Además comparando los valores de directividad presentados en cada zona, podemos concluir que está acorde con el patrón de radiación teórica de una antena bocina donde la mayor directividad está en el lóbulo principal.

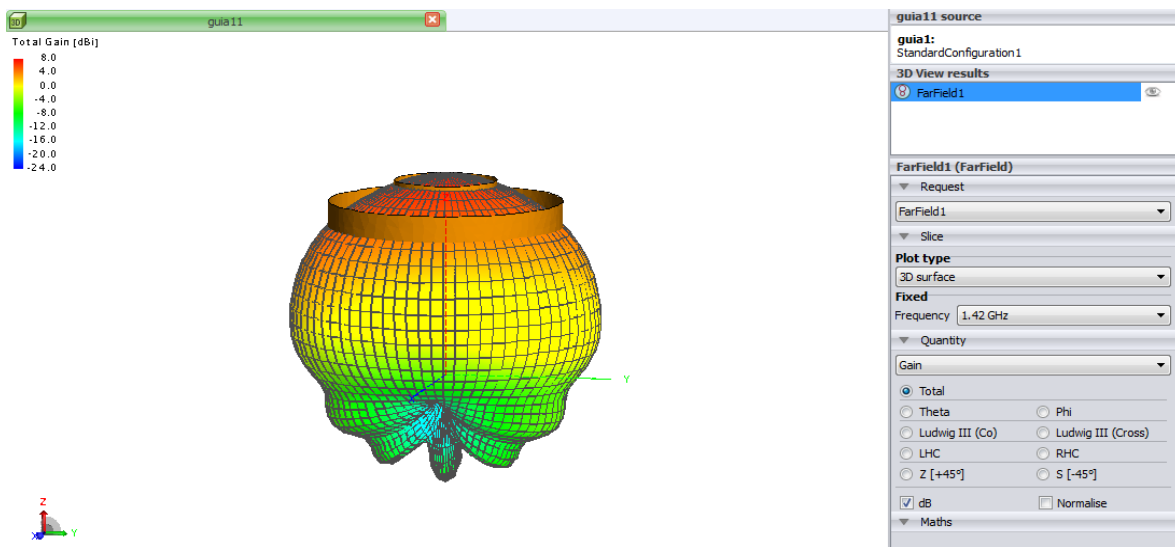


Imagen 21. Patrón de radiación en 3D de antena bocina circular para la frecuencia 1420MHz.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En la Imagen 22 se muestran las minas características del patrón de radiación, la directividad de la antena bocina circular representadas a través de colores que van del azul al rojo (-24 a 8) dBi, pero ahora con un corte transversal en phi que puede mostrar de una manera más clara las características directivas de la antena.

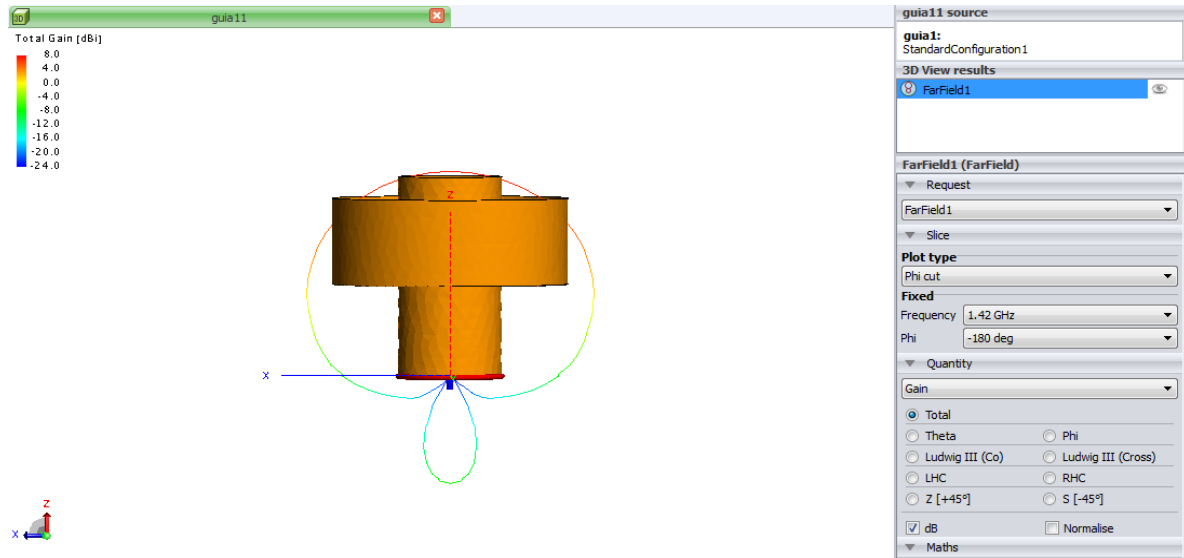


Imagen 22. Corte transversal del patrón de radiación de antena bocina circular para la frecuencia 1420MHz.

El diagrama de radiación en coordenadas polares expuesto en la Imagen 23, muestra la dirección en donde se encuentra la mayor radiación de la antena representada por el lóbulo principal, además se muestran los lóbulos secundarios y la dirección donde la radiación se hace cero, con estos parámetros se puede caracterizar la antena y poder saber si el modelo de la antena ofrece condiciones óptimas para realizar del proceso de captura de señales radioeléctricas.

Por ejemplo para este diseño el patrón de radiación en coordenadas polares dice que se tiene en el lóbulo de principal radiación una ganancia de 7.214 dB, que es aceptable.

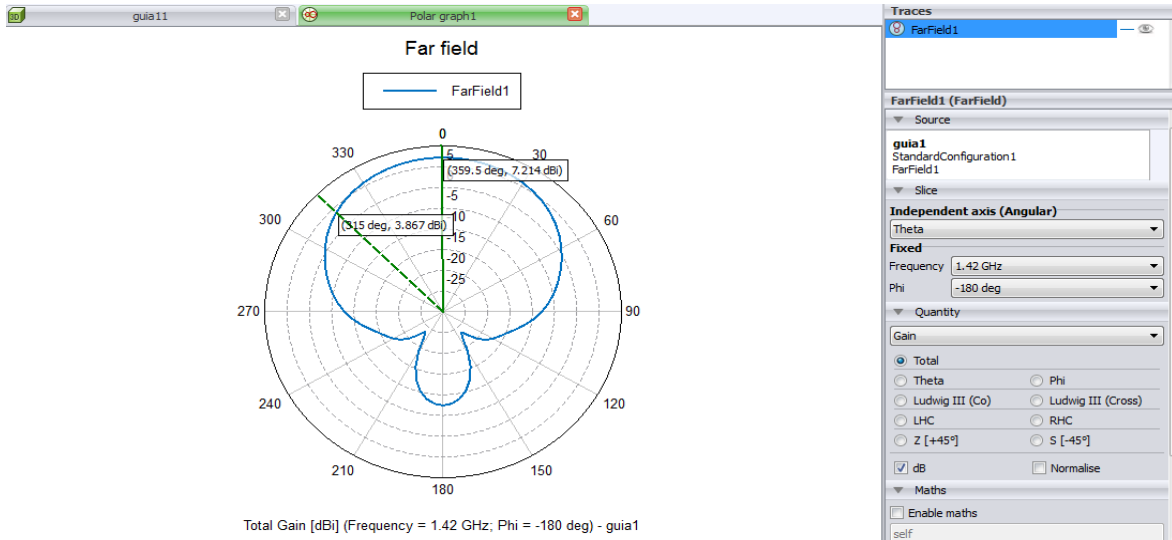


Imagen 23. Patrón de radiación en coordenadas polares de antena bocina circular para la frecuencia 1420MHz.

En la Imagen 24 se puede apreciar el patrón de radiación en coordenadas cartesianas para la antena bocina circular que representa las mismas características mostradas en el patrón de radiación en coordenadas polares.

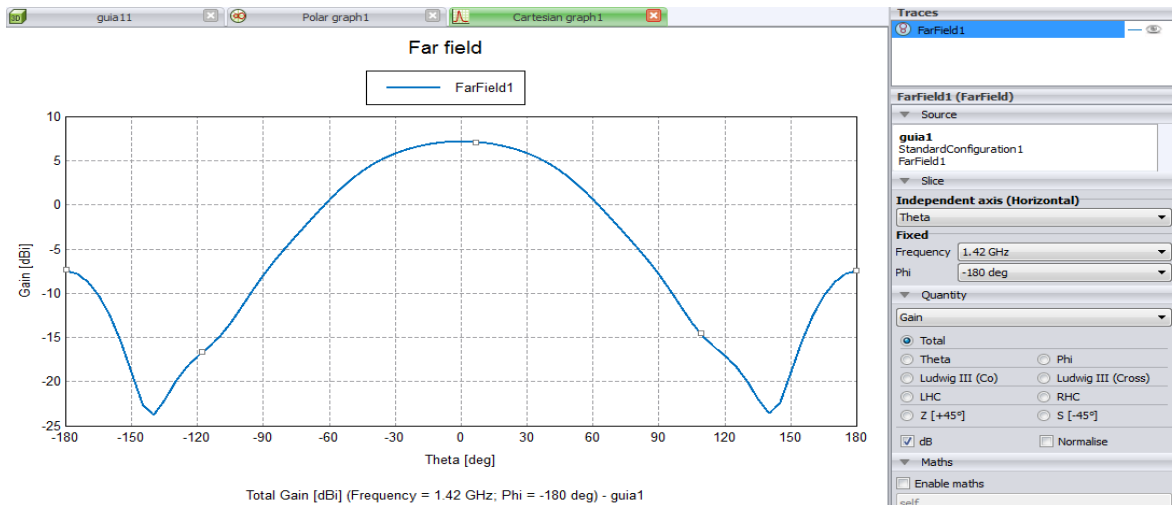


Imagen 24. Patrón de radiación en coordenadas cartesianas de antena bocina circular para la frecuencia 1420MHz.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

La relación axial para la antena bocina circular la podemos ver representa en la Imagen 25, se puede apreciar los niveles de contrapolar arrojados por FEKO, que está tomando valores entre (-50 y -5) dB lo que se representa por colores que van desde el azul al rojo.

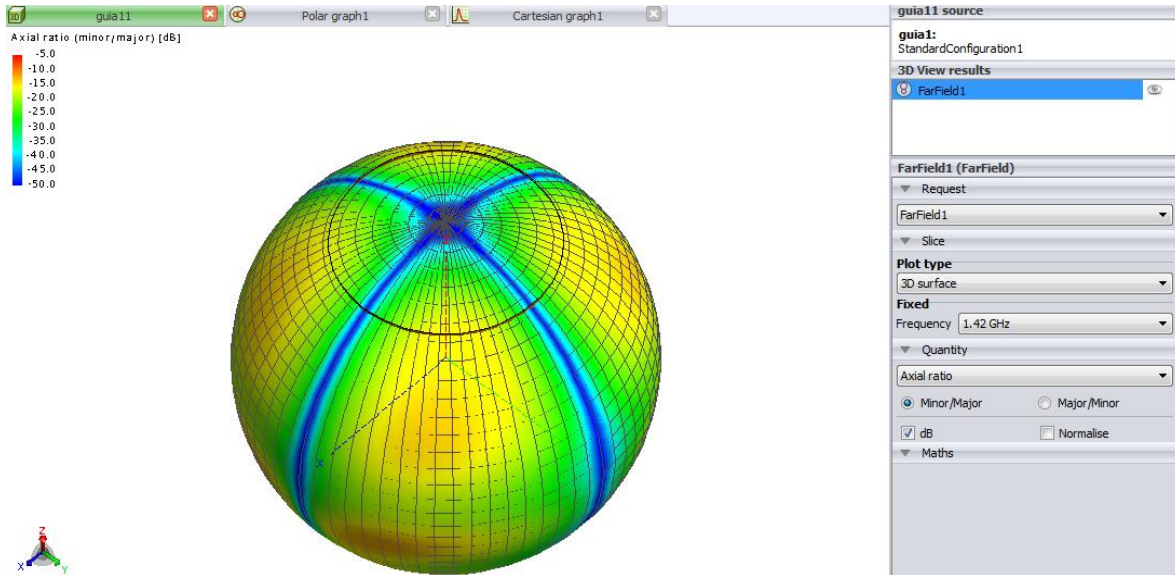


Imagen 25. Relación axial par antena bocina circular en la frecuencia 1420MHz.

En la Imagen 26 se muestra la descomponían de polarización en las componentes circulares ortogonales entre sí para la antena bocina circular. Además se aprecia la circunferencia de mayor radio que corresponde a la componente contrapolar, que tiene valores máximos y mínimos representados por colores del azul al rojo, estos valores oscilantes se encuentran entre (-85 y -40) dB

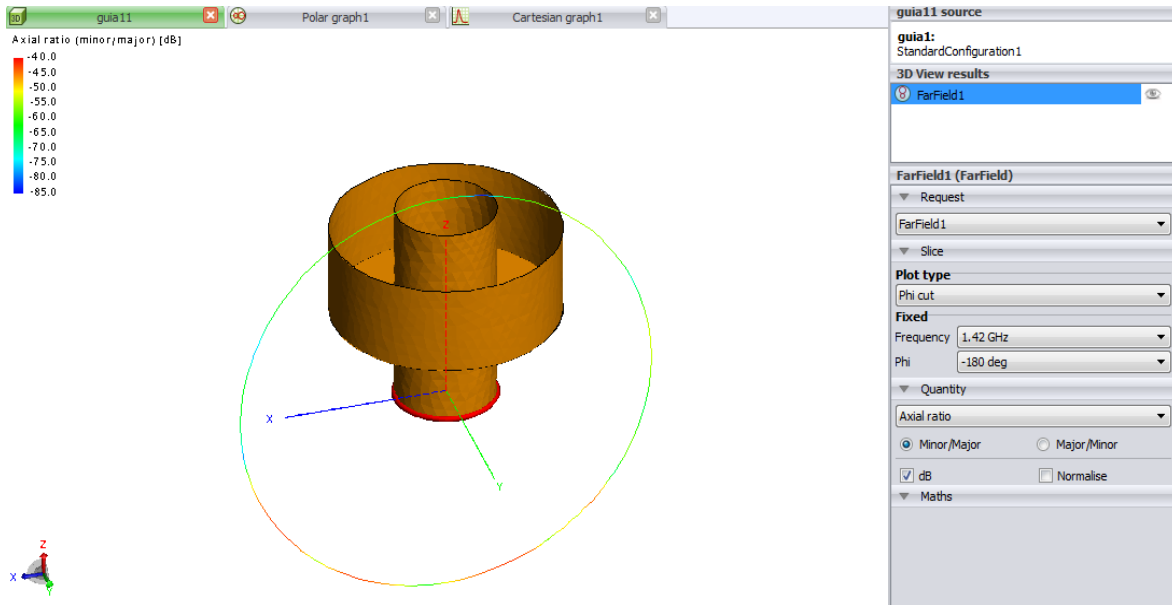


Imagen 26. Relación axial descompuesta en polarización elíptica de la antena bocina circular.

5.3.4 Diseño de antena primaria guía de onda con alimentación de monopolo

Para la antena primaria se va construir una bocina con forma de guía de onda circular a la cual se le ensamblara un anillo de bloqueo (anillo obturador) y se alimentara mediante una sonda (antena monopolo), esta antena estará diseñada para la frecuencia 1420MHz, por lo que es capaz de captar señales de longitud de onda de 21cm que corresponden a las líneas espectrales del hidrógeno neutro que es el elemento más abundante en el universo conocido.

La antena tipo bocina circular del receptor cumple con característica fundamentales como.

- Adaptación a la frecuencia de operación.
- Iluminación eficiente del reflector.
- Bajas perdidas.
- Predecible funcionamiento.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Se puede utilizar para cualquier onda de microondas.
- Puede propagar varios modos de propagación.

Entendiendo que el primer modo en propagarse en una guía de onda circular es el TE₁₁, con el cual se puede encontrar el diámetro mínimo de la bocina circular utilizando la ecuación $\lambda_{TE11} = \lambda = 1.706D_b \rightarrow D_{b\ min} = \frac{1}{1.706}\lambda \rightarrow D_{b\ min} = 0.1236m$. Además también se tiene el segundo modo de propagación TM₀₁ que permite encontrar el diámetro máximo con la ecuación $\lambda_{TM01} = D_{TM01} * r_b \rightarrow \lambda_{TM01} = 2.613r_b \rightarrow D_{b\ max} = 0.1645m$. Con esta se puede escoger un diámetro para la bocina que permita propagar el modo TM₁₁ que es el de interés, por lo tanto valor del diámetro para la bocina circular está entre (0.1236, 0.1645) m. y para este diseño se tomara un diámetro para la bocina circular de $D_b = 0.1477m$.

Ahora para encontrar la longitud de la guía de onda circular $L = 0.68\lambda_g$, se utilizara la ecuación $\lambda_g = \frac{1}{\sqrt{\lambda^2 - \lambda_c^2}}$ donde $\lambda_c = 1.77D_b \rightarrow \lambda_c = 1.77 * 0.68 * \lambda \rightarrow \lambda_c = 0.25396$, por lo tanto $\lambda_g = \frac{1}{\sqrt{(0.211)^2 - (0.25396)^2}} \rightarrow \lambda_g = 0.386m$ y con esto se tiene que $L = 0.76 * 0.386 \rightarrow L = 0.29336m$.

En el diseño de la antena bocina circular, el bloqueo estará formado por un anillo de obturador, el cual posee una medidas de ancho y de profundidad específicas al igual que la posición en la guía de onda.

Para obtener estas medidas se tendrá en cuenta la ganancia de la antena cuando se varían estas medidas en el software de simulación FEKO. Parámetro que sirve para calcular la eficiencia que determina cual son las medidas adecuadas. Este prese se puede ven en la Tabla 4.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Eficiencia (%)		Profundidad del anillo de bloqueo			
		0.07385(m)	0.0844(m)	0.9495(m)	0.1055(m)
Ancho del anillo de bloqueo	0.0633(m)	70 (%)	71 (%)	72 (%)	73 (%)
	0.0844(m)	70 (%)	73 (%)	75 (%)	74 (%)
	0.1055(m)	70 (%)	73 (%)	76 (%)	75 (%)
	0.1266(m)	70 (%)	73 (%)	75 (%)	76 (%)
	0.1477(m)	70 (%)	73 (%)	17 (%)	74 (%)

Tablas 4. Valores de eficiencia para diferentes anchuras y profundidades del anillo de bloqueo en la antena bocina circular.

Finalmente partiendo de las medidas expuestas en la Tabla 5 y el software de simulación para diseño de antenas FEKO se empieza a realizar el ensamble del receptor para el radiotelescopio que catara señales ubicadas en la frecuencia de 1420MHz y longitud de onda de 21cm correspondientes a las líneas espectrales del hidrógeno neutro.

Frecuencia de operación	1420MHz	
Diámetro del monopolo		0.00015 (m)
Longitud del monopolo	0.23λ	$L = \frac{\lambda}{4} = 0.05281 (m)$
Diámetro de la guía de onda	0.68λ	0.1477 (m)
Longitud de la guía de onda	$0.76\lambda_g$	0.29336(m)
Posición del monopolo	0.24λ	0.09664 (m)
Profundidad del anillo de bloqueo para la guía de onda	0.62λ	0.1266 (m)
Radio del anillo de bloqueo para la guía de onda	0.45λ	0.0949 (m)
Posición del anillo	0.15λ	0.03165(m)

Tablas 5. Medidas físicas de la antena bocina circular con alimentación de monopolo.

Para realizar el diseño del receptor de señales de radiofrecuencia se tuvieron presentes algunos parámetros importantes como, frecuencia de operación, modos de transmisión en guías de onda, medidas de acoplamiento de las medidas en la antena bocina. Además de la máxima radiación de la fuente a observar.

Este modelo lo podemos apreciar en la imagen 27, el cual se desarrolló en el software de simulación FEKO, se presenta la implementación de una antena bocina circular con anillo

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

de bloque y alimentación mediante sonda (antena monopolo). Este diseño será el encargado de recibir las señales de radiofrecuencia para pasarlas a la etapa de procesamiento y poder realizar los análisis correspondientes.

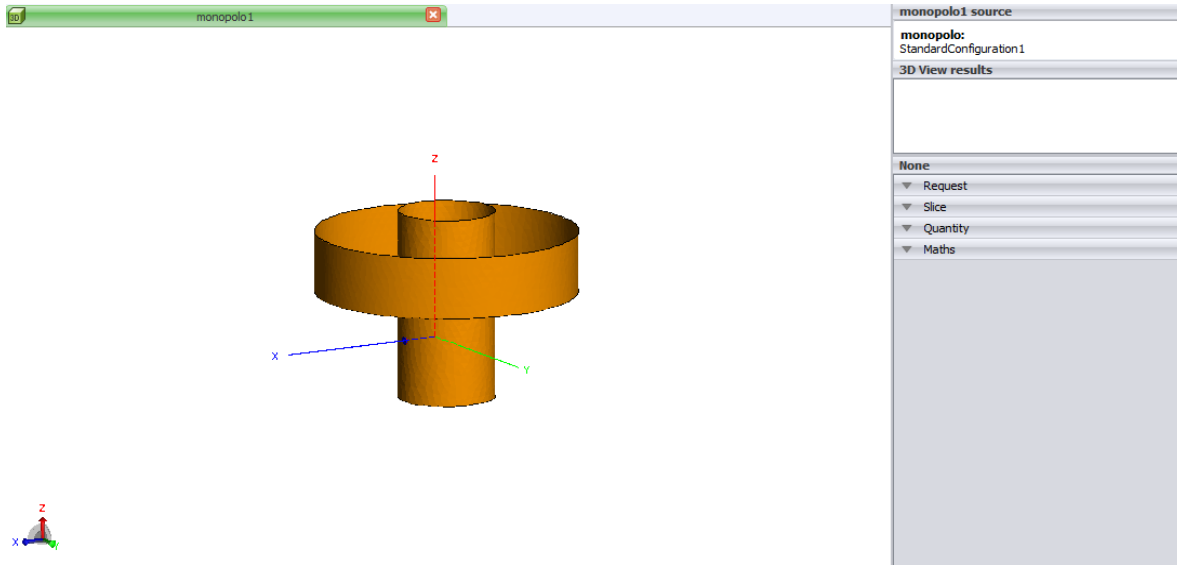


Imagen 27. Receptor primario para radio telescopio con frecuencia de operación en 1420MHz.

Se puede ver en la Imagen 28 el patrón de radiación tridimensional de la antena primaria del receptor, en este se pueden observar la concentración de energía representada por diferentes franjas las cuales están caracterizadas por colores que representan una zona específica de radiación, que va desde el color azul en su punto de menor concentración con (-35dB), hasta el color rojo en su punto de mayor concentración con (10dB). Estos datos son ofrecidos por el software de simulación FEKO partiendo del modelo de antena primaria diseñada específicamente para la frecuencia de 1420MHz y alimentación con sonda (antena monopolo).

En el patrón de radiación tridimensional para la antena bocina circular también se puede observar que los lóbulos secundarios son muy pequeños lo que indica que radiación trasera es muy baja en comparación con la radiación delantera que es la que nos interesa para poder tener la mayor ganancia posible y poder tener un buen diseño de antena que garantice una buena recepción de señales.

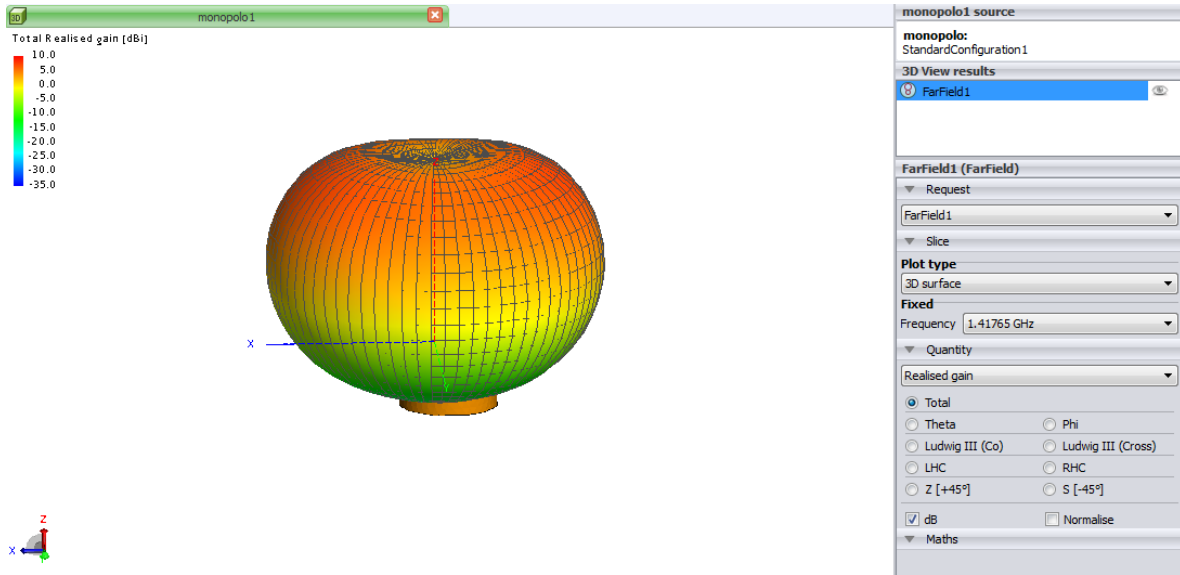


Imagen 28. Patrón de radiación en 3D de la antena del receptor.

En la Imagen 29 se muestra el corte transversal del patrón de radiación tridimensional, en el que se puede ver de manera bidimensional la intensidades de radiación representadas a través de colores que van del azul al rojo con (-35 a 10) dB, con este corte se puede mostrar de una manera más clara las características de la antena.

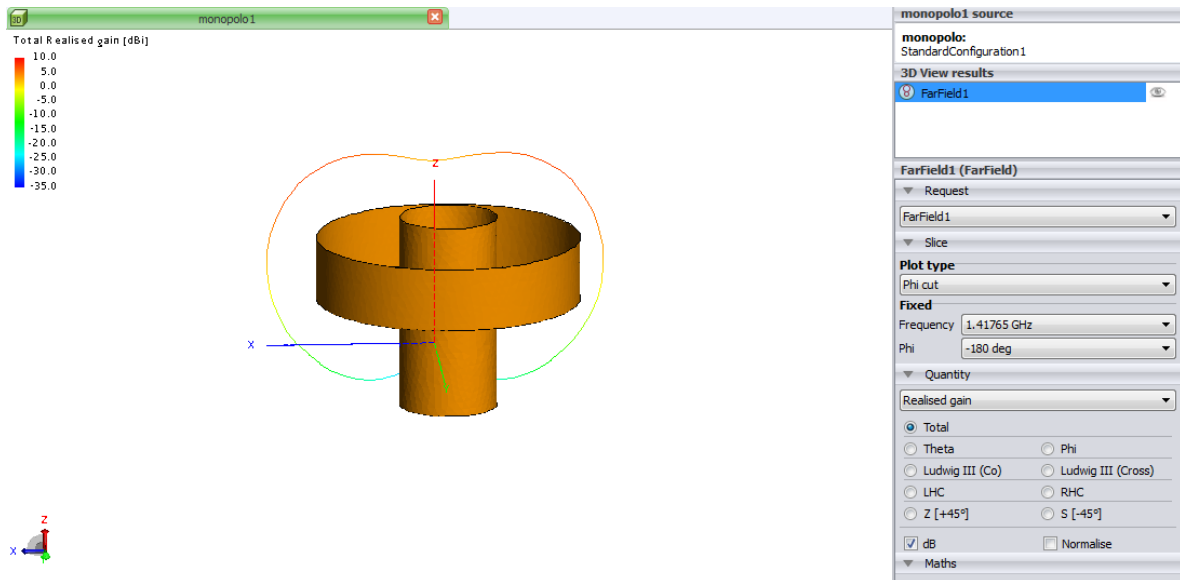


Imagen 29. Corte del plano phi del patrón de radiación en 3D de la antena del receptor.

En la Imagen 30 se presenta el diagrama de radiación en coordenadas polares para la antena receptora bocina circular con alimentación atreves de sonada (antena monopolo), se puede observar en el gráfica los ángulos que representan la dirección del espacio donde el radio representa la intensidad de campo radiado o la intensidad de potencia radiada para la antena. La dirección en que se encuentra la mayor radiación de la antena está ubicada en el lóbulo principal con (7.03 dB). Además se muestran los lóbulos secundarios y la dirección donde la radiación se ase cero.

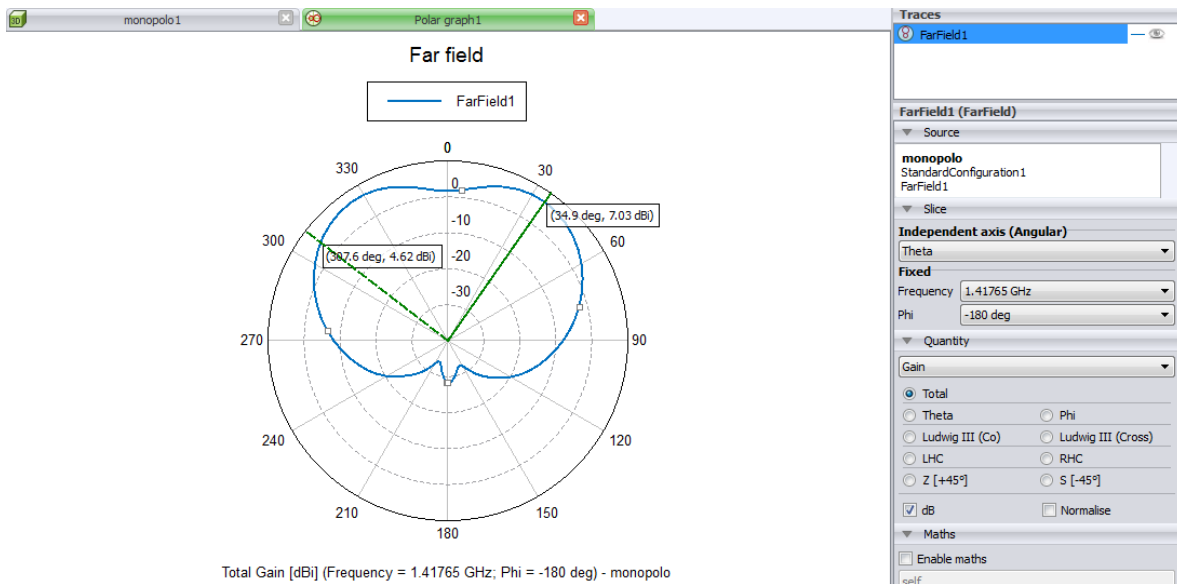


Imagen 30. Patrón de radiación en coordenadas polares de antena receptora.

El patrón de radiación en coordenadas cartesianas de la antena primaria bocina circular presentado en la Imagen 31 permite realizar la comprobación de los mismos parámetros que el patrón de radiación en coordenadas polares pero bajo un sistema bidimensional donde se aprecia de manera gráfica la dirección y concentración de la directividad en la antena, lo que permite saber que tan eficiente es el diseño del receptor en el momento de capturar señales.

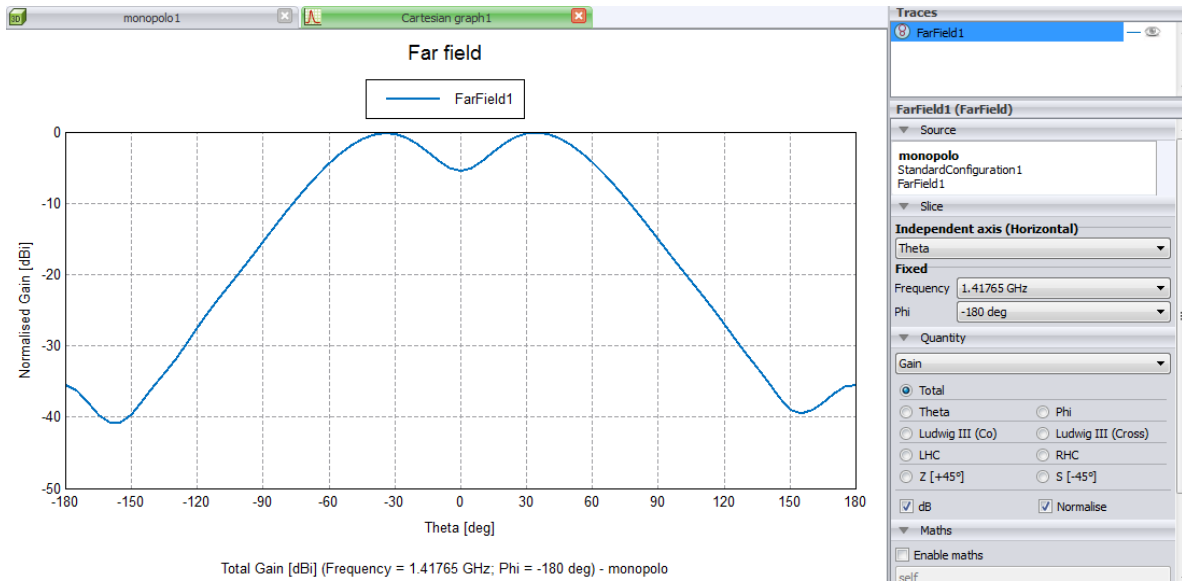


Imagen 31. Patrón de radiación en coordenadas cartesianas de antena receptora.

Es de vital importancia conocer algunos parámetros como el voltaje VSWR en los diseños de antenas de radiofrecuencia, para poder entender el funcionamiento eléctrico en estos sistemas de recepción o transmisión de señales, Ejemplo de esto se representado en la Imagen 32 la cual presenta la relación existente entre la suma de voltaje incidente (V^i) con voltaje reflejado (V^r), dividido la diferencia de estos voltajes dada en la antena receptora.

La relación llamada VSWR se representa mediante la ecuación $VSWR = \frac{V^i + V^r}{V^i - V^r} = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma}$, y el modelo de la antena receptora desarrollada utilizando el software de simulación FEKO presenta para este parámetro una curva descendente de voltaje con respecto a la frecuencia hasta llegar a la frecuencia de operación del receptor que representa el punto más bajo, luego la curva comienza a crecer.

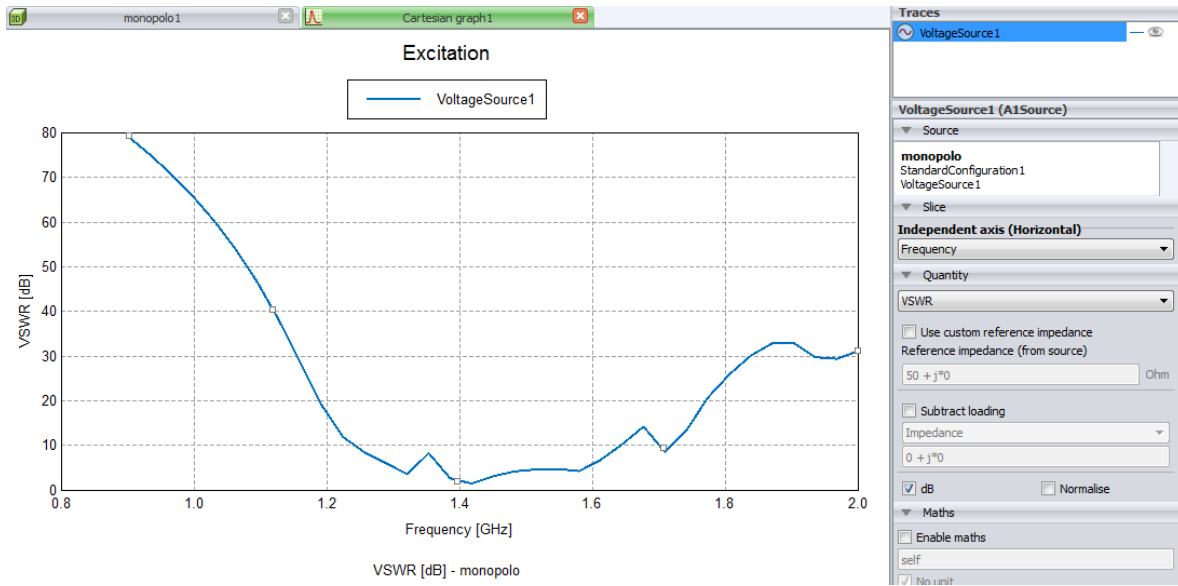


Imagen 32. Parámetro VSWR antena receptora.

El coeficiente de reflexión para la antena receptora primaria, este parámetro indica la relación de onda estacionaria con respecto a un voltaje VSWR, o también se puede ver como el valor absoluto de la diferencia de la impedancia de entrada de la antena con la impedancia característica de la línea de transmisión dividido su suma.

El coeficiente se representa mediante la ecuación. $\Gamma = \frac{V^r}{V^i} = \frac{|z_{in} - z_0|}{z_{in} + z_0}$.

En la Imagen 33 se presenta el coeficiente de reflexión para la antena bocina circular con alimentación mediante sonda (antena monopolo), se puede ver en el grafico que se realiza un escaneo partiendo en 900Mhz hasta llegar a 2Ghz, además se puede apreciar que el pico más bajo se acopla con la frecuencia de operación de 1420Mhz donde se tiene un valor mínimo de (-22) dB, lo que quiere decir que la antena esta resonando en la frecuencia adecuado y el voltaje reflejado es muy pequeño lo que indica una buena adaptación de sistema de recepción de señales.

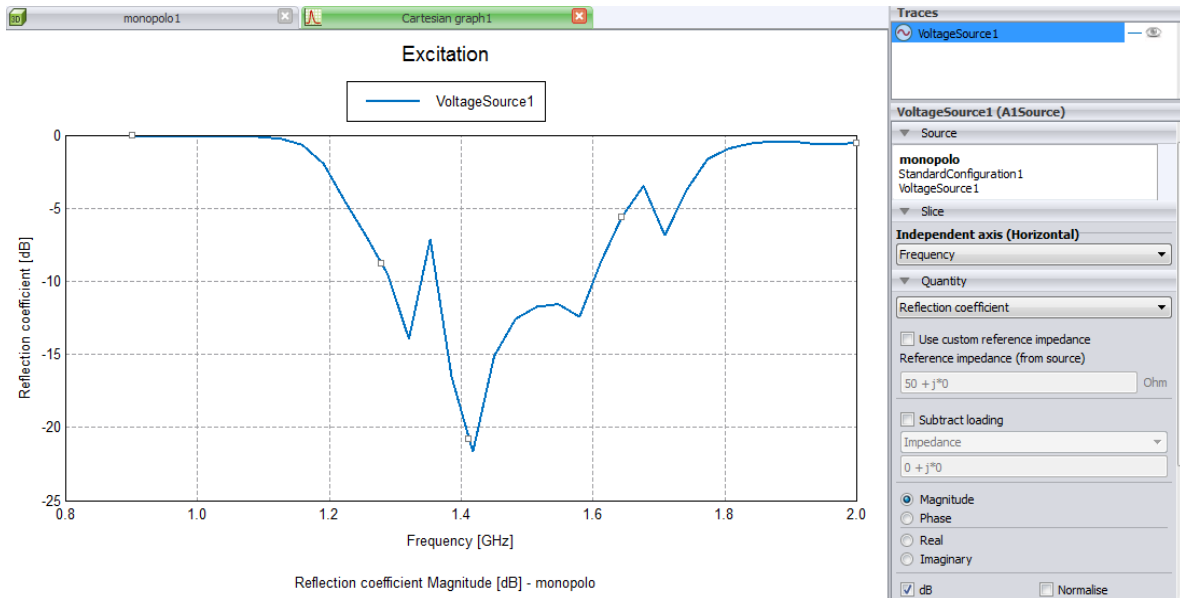


Imagen 33. Coeficiente de reflexión antena receptora.

La teoría de antena dice que el parámetro S11 permite realizar un análisis detallado de la operación de la antena ya que se realizan un barrido en frecuencia para mostrar los puntos donde la antena es más resonante. El parámetro S11 se representa mediante la ecuación.

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} \Big|_{a_2=0} \text{ Donde se tiene que, } a_1 = \frac{1}{2\sqrt{z_0}} (V_l + z_{0il}) \text{ Y } b_1 = \frac{1}{2\sqrt{z_0}} (V_l - z_{0il}).$$

En la Imagen 34 se puede notar la representación del parámetro S11 que arroja el software de simulación FEKO para la antena receptora bocina circular con alimentación de sonda (antena monopolo), este parámetro se realizó utilizando un barrido de frecuencia que va desde 900Mhz hasta 2Ghz, en este grafico podemos ver que el parámetro S11 parte de 0dB, hasta una frecuencia específica que se denominó frecuencia de corte, esta indica que no se está propagando nada por la guía de onda, luego cuando se sobrepasa ese valor se comienza a propagar en la guía de onda el modo fundamental donde el pico más bajo corresponde a la frecuencia de operación de 1420MHz para la cual está diseñada esta antena, desde este punto el grafico crece hasta llegar a 0 dB. Este comportamiento indica que la antena está rezando de manera adecuada.

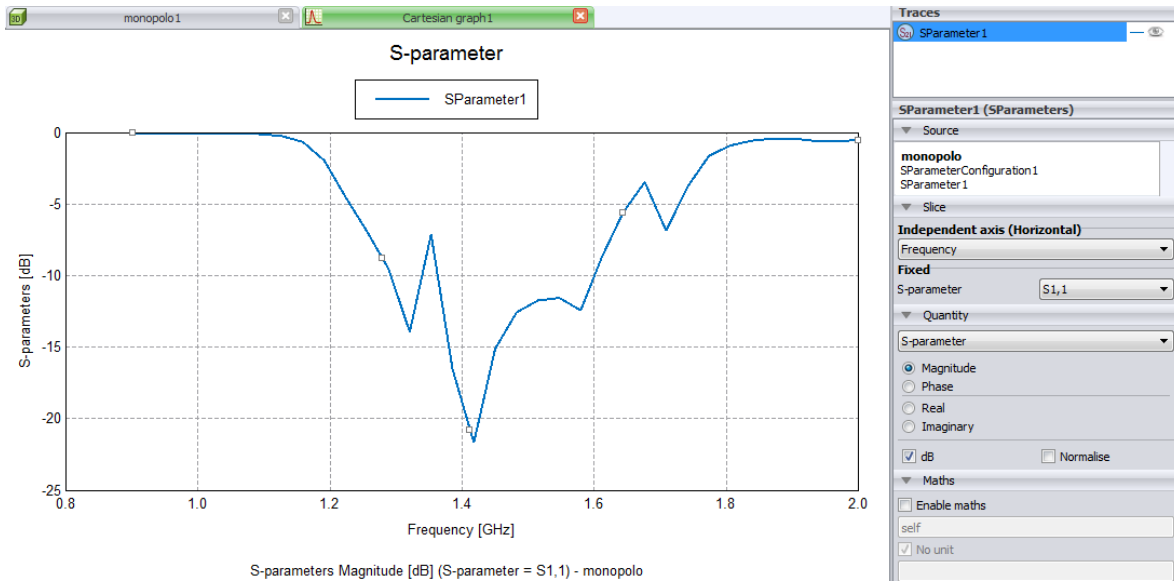


Imagen 34. Parámetro S11.

Las antenas que se utilizan en radiofrecuencia presentan características principales para poder captar señales de manera adecuada, una de estas es la pureza de polarización que utilizara la relación de los campos radiados, esta se presenta como la suma de los módulos del campo máximo radiado en la polarización, dividido la diferencia de las módulos de los campos radiados que se conoce como relación axial.

Esta relación axial toma teóricamente valores entre 1 e infinito. Donde la polarización circular toma valores iguales a uno y la polarización lineal tomo valores en el infinito. Esta

relación se entiende mediante la ecuación $AR = \frac{|\vec{E}_{AHC}| + |\vec{E}_{LHC}|}{|\vec{E}_{AHC}| - |\vec{E}_{LHC}|}$.

Ahora en la imagen 35 se puede aprecia los niveles de contrapolar arrojados por software de simulación FEKO que son la representación de la relación axial de la antena bocina circular con alimentación de sonda (antena monopolo). Estos están definen como la relación entre la componente a izquierdas y la componente a derechas de polarización, resultando que se representa por colores desde el azul al rojo con representación de valores para la antena desde (-45 a 0) dB.

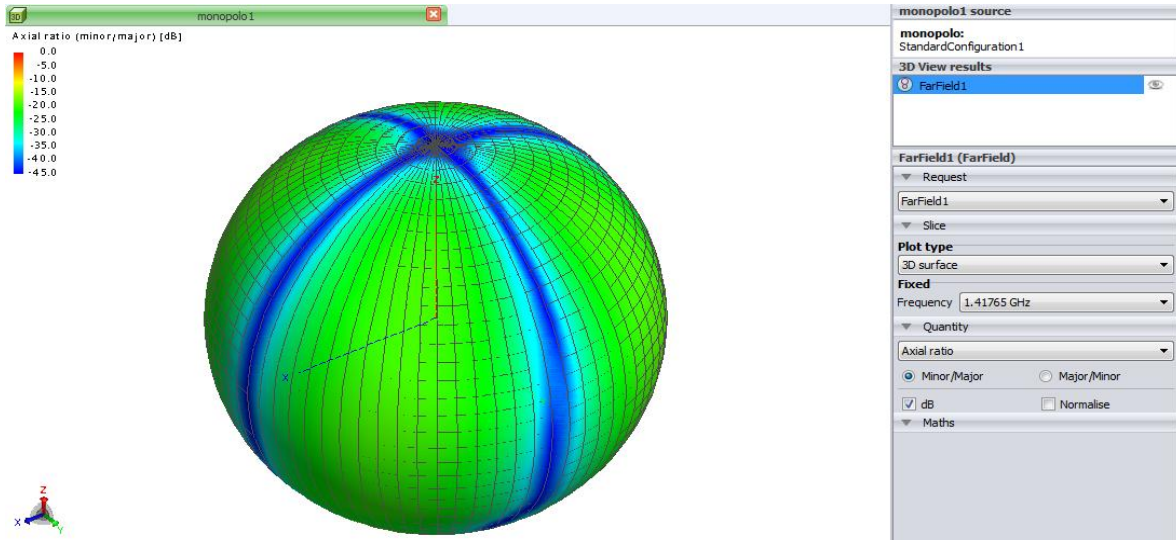
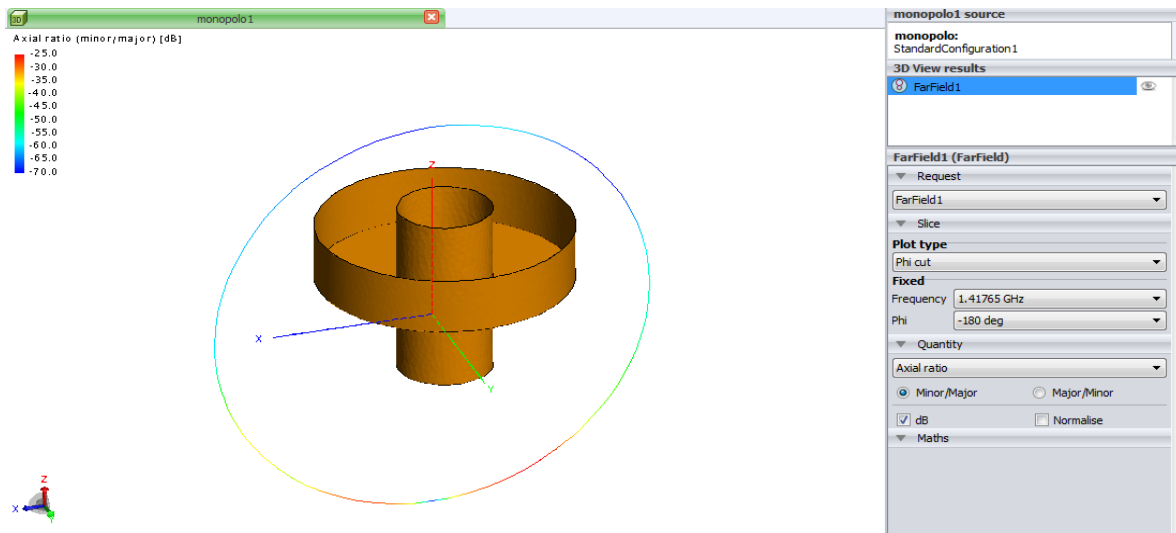


Imagen 35. Relación axial para antena receptora.

La polarización se puede descomponer en sus componentes ortogonales donde el eje mayor de la elipse se representa como la suma de los radios de las dos componentes sumados en fase y el eje menor está representado por la diferencia de las mismas componentes, también se puede ver como la suma en oposición de fase.

En la imagen 36 se aprecia el sentido de polarización de la antena receptora que es representada por la circunferencia de mayor radio.



	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Imagen 36. Relación axial descompuesta en polarización circular para antena receptora.

5.4 Análisis geométrico del plato paraboloide para la antena receptora

Para diseñar el reflector paraboloide para la antena colectora de señales en la frecuencia de 1420MHz, se parte de la ecuación.

$$y^2 = 4f(x) \quad (5.16)$$

$$\frac{y^2}{a^2} + \frac{x^2}{a^2} = z \quad x^2 + y^2 = a^2 \quad (5.17)$$

Además se tienen en cuenta algunos parámetros geométricos que permiten contralar las dimensiones del reflector parabólico.

5.4.1 Diámetro del receptor parabólico (Dp)

Representa el longitud del reflector, además se observa que a medida que (D) crece el reflector aumenta de tamaño en consecuencia la ganancia de la antena también aumenta al tener más área de iluminación.

5.4.2 Distancia focal del receptor parabólico (f)

Es la representación de la distancia focal, esta medida se toma desde el centro de la parábola hasta un pito llamado foco, lugar donde se concentran todos los rallas reflejados por el reflector, y es el lugar donde se pondrá la antena (bocina circular).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5.4.3 Profundidad del receptor parabólico (c)

Es el parámetro que permite conocer la profundidad del reflector paraboloide, para conocer su forma, está dado mediante la relación entre D y F.

$$c = \frac{D^2}{16f} = \frac{D}{16\left(\frac{f}{D}\right)} \quad (5.18)$$

5.4.4 Grado de inclinación (θ_0)

Representa el ángulo de inclinación que va desde el focal hasta la parte superior del plato reflector.

$$\theta_0 = 2 \tan\left(\frac{1}{4\frac{f}{D}}\right) \quad (5.19)$$

5.4.5 Área de un reflector parabólico (A)

El área del reflector parabólico representa el espacio geométrico total que será utilizado para reflejar los raios de iluminación y concentrarlos en el foco.

$$A_{tol} = \iint_D \sqrt{1 + \left(\frac{\partial Z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial y}\right)^2} dA \quad (5.20)$$

Para pasar de coordenadas cartesianas a polares tenemos. (James Setewart, 2002)

$$A_{tol} = \int_0^{2\pi} \int_0^r \sqrt{1 + 4\left(\frac{r}{a}\right)^2} r dr d\theta \quad (5.21)$$

Luego como el área de captación es un círculo de la forma $x^2 + y^2 = a^2$, se puede escribir el área efectiva del receptor parabólico en función de su diámetro.

$$A_{efc} = \frac{\pi D^2}{4} \quad (5.22)$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5.4.6 Máxima ganancia de un reflector parabólico (G)

Para calcular la máxima ganancia en un reflector parabólico se tiene la relación entre el área efectiva y la longitud de onda recibida, expresada de la forma.

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_{efc} \quad (5.23)$$

Ahora si reemplaza la ecuación (29) en la (30) la ganancia queda expresada.

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} \frac{\pi D^2}{4} \rightarrow G = \left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2 \quad (5.24)$$

Pero si se tiene presente que en un reflector parabólico bien construido e iluminado la máxima ganancia esta corregida por un factor de eficiencia $\eta = \prod_i^n \eta_i$, por tanto la ganancia queda expresada. (Aznar, 2002)

$$G = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2 \quad (5.25)$$

5.5 Análisis partiendo del concepto de óptica geométrica

A partir de las leyes de la geometría se pueden realizar los análisis de cómo se propaga una onda electromagnética, teniendo como base “el régimen permanente sinusoidal” con el cual se permite representar compas formas como.

$$\vec{E}(x, y, z, t) = \vec{E}(x, y, z) e^{j(\omega t - k\psi(x, y, z))} \quad (5.26)$$

Ahora si en las ecuaciones de Maxwell se asume $\lambda = 0$ se consigue.

$$|\nabla\psi(x, y, z)| = n(x, y, z), \quad n = \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \quad (2)$$

Donde n representa el índice de refracción, además se cumple que $\vec{E}_0 \perp \psi$, $\vec{H}_0 \perp \nabla\psi$, $\vec{S} \parallel \nabla\psi$ siendo ψ constante y además es una superficie equipotencial.

Utilizando la ley de intensidad de la óptica geométrica, que dice que los rayos son familia de curvas normales a las superficies equipotenciales representadas por $\nabla\psi$, además estos rayos se pueden modelar como “tubos” por donde se realiza la propagación que cumple con la

ley de conservación de la energía para medios sin pérdidas, ya que estos son medios homogéneos donde $n=cte$, similar a lo que ocurre cuando se realizan estudios con reflectores donde los rayos que inciden son rectilíneos y los campos cumplen las mismas propiedades de las ondas planas en un entorno local. (Ramón Angosto Sánchez, 2015)

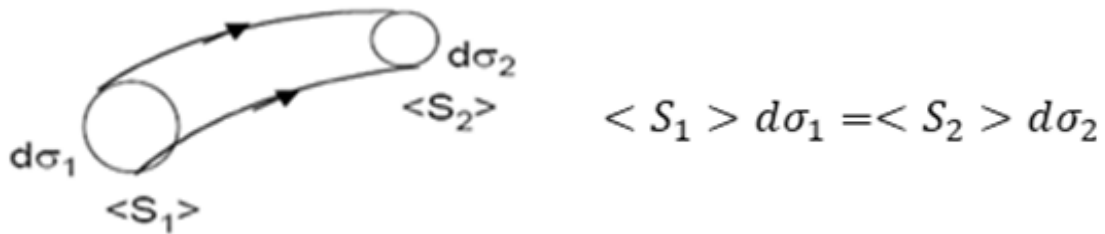


Imagen 37. Ley de intensidad de la óptica geométrica. (Ramón Angosto Sánchez, 2015).

5.5.2 Ley de Snell

- “El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal a la superficie en el punto de reflexión están en el mismo plano”.
- “Reflexión: El ángulo de incidencia y de reflexión (medido respecto de la normal) son iguales”.
- “Refracción: La relación entre los senos de los ángulos de incidencia y refracción es proporcional a los índices de refracción”.

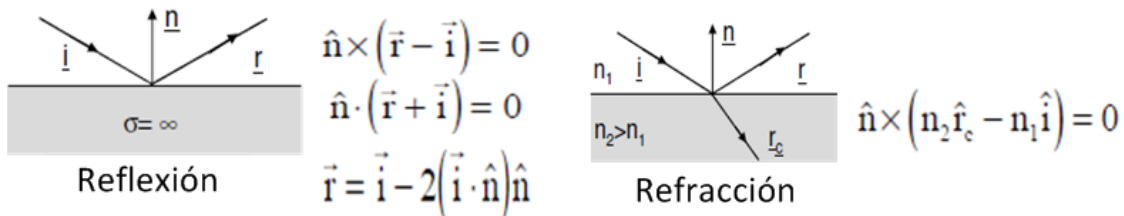


Imagen 38. Reflexión y refracción (Ramón Angosto Sánchez, 2015).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

La ley de Snell permite mostrar como cada punto que incide en cualquier superficie reflectora ingresa por un plano tangente conductor perfecto, proporcionando la condición de contorno donde $\vec{E}_{total\ tangente} = 0$ y además cumple con la ley de Snell.

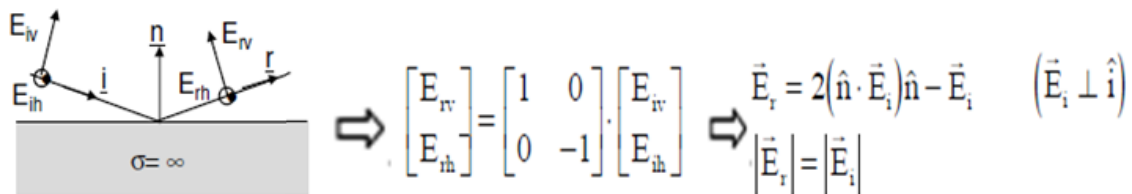


Imagen 39. Ley de Snell (Magdalena. Avilés, 2015).

Las anteriores condiciones se pueden aplicar a los reflectores solo en el punto de alimentación, ya que las ondas incidentes y las reflejadas dependen de este, además de la forma de la superficie del reflector.

Las ondas que se tiene para iluminar un reflector basado en cuadrícula son. (W Edward Gettys, 2005)

- Ondas Esféricas $\vec{E} = \vec{E}_0 \frac{e^{-jk\vec{r}}}{\vec{r}}$ alimentador fuente puntual.
- Ondas Cilíndricas $\vec{E} = \vec{E}_0 \sqrt{\frac{1}{\rho}} e^{-jk\rho}$ campo próximo de una fuente lineal.
- Ondas Planas $\vec{E} = \vec{E}_0 e^{-jkz}$ onda colimado por reflector parabólico.

5.6 Análisis de reflector mediante óptica física

Partiendo del concepto de campo que radia una antena la cual está compuesta por un reflector dependiente para su buen funcionamiento de características en la antena como, ancho del haz, niveles de los lóbulos, polarización, además de los parámetros geométricos, distancia focal, diámetros.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Ahora para realizar el análisis de ondas electromagnéticas a partir del método de las corrientes inducidas en el reflector, se parte del concepto de radiación de campo lejano para las antenas, que permite expresar la densidad de potencia incidente en la forma.

$$p(\theta', \phi') = \frac{|\vec{E}_i|^2}{\eta} = \frac{W_t}{4\pi r^2} D(\theta', \phi') \quad (5.27)$$

Luego como el campo incidente en el reflector de la antena tiene orientación vectorial que depende del tipo de polarización y de la fase por tanto el campo incidente se puede expresar.

$$\vec{E}_i = \frac{e^{-jk\vec{r}}}{\vec{r}} \left(\frac{\eta W_t D(\theta', \phi')}{4\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \vec{e}_i \quad (5.28)$$

Seguidamente para obtener el campo eléctrico reflejado se debe cumplir con las condiciones de campo tangencial, que dice que los campos incidentes y reflejados deben de ser cero.

$$\vec{n} \times (\vec{E}_i + \vec{E}_r) = 0 \quad (5.29)$$

Además los campos magnéticos y eléctricos se relacionan mediante las expresiones.

$$\vec{H}_i = \frac{(\vec{n}_i \times \vec{E}_i)}{\eta} \quad (5.30)$$

$$\vec{H}_r = \frac{(\vec{n}_i \times \vec{E}_r)}{\eta} \quad (5.31)$$

Por lo tanto la corriente inducida en el reflector para conductor perfecto y radio de curvatura infinito se obtiene mediante la expresión.

$$\vec{J}_s = \vec{n} \times (\vec{H}_i + \vec{H}_r), \quad \vec{J}_s = 2\vec{n} \times \vec{H}_i, \quad \vec{J}_s = \frac{2}{\eta} (\vec{n} \times (\vec{n} \times \vec{E}_i)) \quad (5.32)$$

El vector de radiación de la corriente inducida es.

$$\vec{N} = \int \vec{J}_s e^{jk\vec{r}\vec{r}'} d\vec{s}' \quad (5.33)$$

Ahora para calcular el campo eléctrico radiado generado por la inducción de corriente expresada en la ecuación (38) se tiene la ecuación.

$$\vec{E}_r = \frac{-j\omega\mu e^{-jk\vec{r}}}{4\pi\vec{r}} \iint_{\vec{s}} [\vec{J}_s(\vec{r}') - (\vec{J}_s(\vec{r}') \cdot \vec{r})\vec{r}] e^{jk\vec{r}\vec{r}'} d\vec{s}', \text{ s superficie iluminación}$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Seguidamente como se conoce \vec{j}_s en la superficie del reflector, entonces se puede escribir una función para la apertura de la siguiente manera $\vec{f}(\vec{r}, \phi)$ la cual se puede encontrar si utilizamos el jacobino de la siguiente manera.

$$\vec{f}(\vec{r}, \phi) = \vec{j}_s(\vec{r}', \phi', z) \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z}{\partial \vec{r}'}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial \phi'}\right)^2} \quad (5.34)$$

Como se tiene simetría de revolución la ecuación (41) se puede escribir de la siguiente manera.

$$\vec{f}(\vec{r}, \phi) = \vec{j}_s(\vec{r}', \phi', z) \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z}{\partial \vec{r}'}\right)^2} \quad (5.35)$$

De lo anterior se puede expresar el campo radiado en función de la apertura. (Carnicer e Ignasi Juvells, 2003)

$$\vec{E}_r = \frac{-j\omega\mu e^{-jk\vec{r}}}{4\pi\vec{r}} \iint_{\vec{s}_0} [\vec{f} - (\vec{f} \cdot \vec{r})\vec{r}] e^{jk\vec{r}\vec{r}'} d\vec{s}'_0 \quad (5.36)$$

5.7 Análisis de reflector mediante apertura

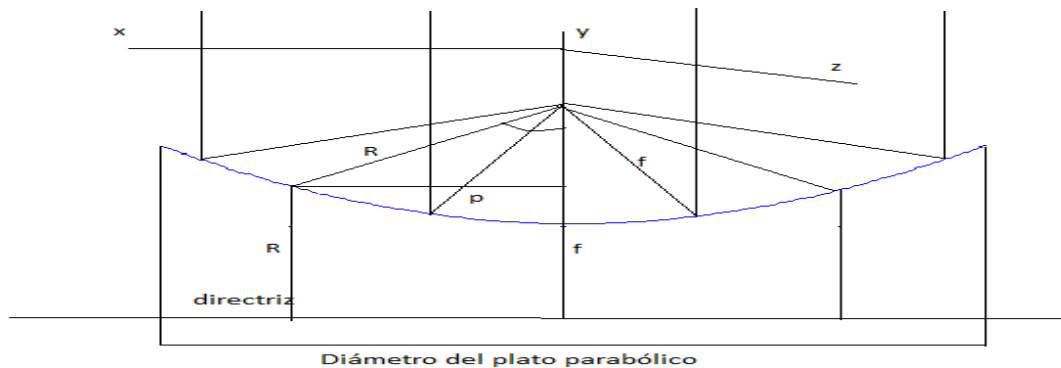


Imagen 40. Plato reflector parabólico.

En el contexto de los reflectores parabólicos las ondas electromagnéticas tanto en el foco como en el reflector de un sistema de adquisición de señales tiene el comportamiento de ondas esféricas.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Pero en el instante en que las ondas son reflejadas por los platos parabólicos de las antenas, estas se propagan con la forma de ondas planas las cuales cumplen con la característica de que la amplitud del campo es constante y varía la fase, este comportamiento se presenta hasta llegar a la apertura donde se describe el campo eléctrico como.

$$\vec{E}_a = \vec{E}_r e^{jk(z_a+z)} \quad (5.37)$$

Como entre el foco y el reflector se tiene ondas esféricas se cumple la condición de que el modulo del campo sea proporcional al inverso de la distancia del diagrama de campo del foco.

$$|\vec{E}_a| \propto \frac{\sqrt{D(\theta', \phi')}}{r} \quad (5.38)$$

Además la fase es constante $|\vec{E}_a| = jk(R + z_a + z) = cte.$

Ahora si se toma como referencia el centro del reflector parabólico, entonces la directividad que se presenta en esa dirección es D_0 y la trayectoria es f por tanto la atenuación total de los campos se puede describir de la siguiente manera.

$$\tau = 20 \log \left[\frac{\sqrt{D(\theta', \phi')}}{\frac{D_0}{\frac{f}{R}}} \right] \quad (5.39)$$

$$\tau = 10 \text{LOG} \left[\frac{\sqrt{D(\theta', \phi')}}{D_0} \right] + 20 \log \left[\frac{R}{f} \right] \quad (5.40)$$

Luego si se tiene presente las ecuaciones paramétricas de la parábola donde es representada como $R = \frac{f}{\cos^2(\frac{\alpha}{2})}$, por lo tanto la atenuación de los campos en la apertura se puede entender como la diferencia de caminos de las ondas que se representan como una suma de atenuaciones.

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 \quad (5.41)$$

$$\tau = 40 \log \left(\cos \frac{\alpha}{2} \right) + 10 \log \left(\frac{D(\theta', \phi')}{D_0} \right) \quad (5.42)$$

Como ya se conoce el campo en la apertura se pueden calcular los campos radiados por la teoría de abertura circular uniforme, la cual tiene una forma proporcional a la transferencia de los campos en la apertura.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$\iint_{s'} \vec{E}_{u'}(x', y') e^{jk\hat{r}\vec{\rho}'} ds' = \vec{E}_{u'} \left(\pi a^2 2 \frac{\vec{J}_1(kasen\theta)}{kasen\theta} \right) \quad (5.43)$$

Ahora si se tiene simetría de revolución lo que se tiene en cuenta para realizar los análisis es la variación radial de los campos en la apertura los cuales dependen de la relación distancia focal y diámetro de apertura $\frac{f}{2a}$ de donde se puede concluir que sí.

- $0 < \frac{f}{2a} < 1$ Reflector parabólico con curvatura grande.
- $\frac{f}{2a} \geq 1$ Reflector parabólico con curvatura pequeña, cerca de un plano.

Si es necesario conocer a $\frac{f}{2a}$ se puede obtener de las ecuaciones de la parábola en forma paramétrica.

$$\rho^2 = 4f(z + z_0) \quad (5.44)$$

$$\rho^2 = 2ftan\frac{\beta}{2} \quad (5.45)$$

Como $\rho = \frac{a}{2}$ y $h = (z + z_0)$ entonces remplazando tenemos que.

$$\left(\frac{a}{2}\right)^2 = 4f(z + z_0) = 4fh \quad (5.46)$$

$$a = 4ftan\frac{\beta}{2} \quad (5.47)$$

Para relacionar con a $\frac{f}{2a}$ con $\frac{f}{D}$ que es la parte geométrica se tiene que

$$h = \frac{1}{16\left(\frac{1}{2a}\right)} f \quad (5.48)$$

$$tan\frac{\beta}{2} = \frac{1}{4\left(\frac{1}{2a}\right)} \quad (5.49)$$

Las anteriores ecuaciones permiten realizar análisis más detallados de los reflectores parabólicos, lo que contribuye con el mejoramiento de los diseños ya se puede ver como se comportan ciertas variables que influyen en el funcionamiento del reflector.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5.7.1 Directividad del reflector parabólico

Partiendo de los conceptos de apertura circular para analizar un reflector parabólico, donde se conocen las distribuciones de campo, además se tiene que la polarización es circular se pueden escribir los campos de la siguiente manera.

$$\vec{E}_\theta = j \frac{e^{-jk\vec{r}}}{2\lambda\vec{r}} \cos\phi \left(\frac{\eta}{z_0} \cos\theta + 1 \right) \iint_{s'} \vec{E}(x', y') e^{jk_x x'} e^{jk_y y'} dx' dy' \quad (5.60)$$

$$\vec{E}_\phi = -j \frac{e^{-jk\vec{r}}}{2\lambda\vec{r}} \sin\phi \left(\frac{\eta}{z_0} + \cos\theta \right) \iint_{s'} \vec{E}(x', y') e^{jk_x x'} e^{jk_y y'} dx' dy' \quad (5.61)$$

Con lo que se obtiene una directividad del plato parabólico.

$$D_p = \frac{P_m}{\frac{W_t}{4\pi|\vec{r}|^2}} = \frac{4\pi|\vec{r}|^2}{\eta} \frac{|\vec{E}_\theta|^2 + |\vec{E}_\phi|^2}{W_t} \quad (5.62)$$

$$D_p = \frac{4\pi \left[\iint_{s'} \vec{E}_a(x', y') ds' \right]^2}{\lambda^2 \iint_{s'} |\vec{E}_a(x', y')|^2 ds'} = \frac{4\pi \left[\iint_{s'} \vec{E}_a(x', y') \rho d\rho d\phi' \right]^2}{\lambda^2 \iint_{s'} |\vec{E}_a(x', y')|^2 \rho d\rho d\phi'} \quad (5.63)$$

$$D_p = \frac{4\pi}{\lambda^2} \pi a^2 \varepsilon_{il} \quad (5.64)$$

5.7.2 Eficiencia de iluminación

Teniendo presente que en la apertura los campos son proporcionales al caminos recorrido por las ondas electromagnéticas y a los diagramas de la antena en el foco, entonces por simetría de revolución tenemos que en la campo en la apertura.

$$\vec{E}_a = \frac{e^{-jk\vec{r}}}{\vec{r}} \left(\frac{\eta W_t D(\alpha)}{4\pi} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-jk(x_a - x)} \hat{e}_r \quad (5.65)$$

$$\vec{E}_a = \vec{E}_0 \frac{\sqrt{D(\alpha)}}{R} \quad (5.66)$$

Si tenemos en cuenta las ecuaciones de la parábola en forma paramétrica se escribir la eficiencia de iluminación de la siguiente manera.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$\eta_{il} = \frac{1}{\pi a^2} \frac{[\iint_{s'} \vec{E}_a(x', y') \rho d\rho d\phi']^2}{\iint_{s'} |\vec{E}_a(x', y')|^2 \rho d\rho d\phi'} \quad (5.67)$$

$$\eta_{il} = \frac{1}{\pi a^2} \frac{[\iint_{s'} \frac{\sqrt{D(\alpha)}}{R} \rho d\rho d\phi']^2}{\iint_{s'} \left| \frac{\sqrt{D(\alpha)}}{R} \right|^2 \rho d\rho d\phi'} \quad (5.68)$$

Luego si se utiliza la relación $\tan \frac{\beta}{2} = \frac{1}{4 \left(\frac{1}{2a} \right)}$ la eficiencia de iluminación queda representada por.

$$\eta_{il} = 2 \cot^2 \frac{\beta}{2} \frac{\left[\int_0^\beta \sqrt{D(\alpha)} \tan \frac{\alpha}{2} d\alpha \right]^2}{\int_0^\beta D(\alpha) \operatorname{sen} \alpha d\alpha} \quad (5.69)$$

5.7.3 Eficiencia de desbordamiento

La eficiencia de desbordamiento se presenta como como una relación entre potencia radiada del alimentador ubicado en el foco y la potencia total radiada en el sistema.

$$\eta_s = \frac{W_{refl}}{W_{total}} \quad (5.70)$$

$$\eta_s = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^\beta P(\theta', \phi') ds}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi P(\theta', \phi') ds} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^\beta D(\theta', \phi') d\Omega}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi D(\theta', \phi') d\Omega} \quad (5.71)$$

$$\eta_s = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\beta D(\theta', \phi') d\Omega \quad (5.72)$$

5.7.4 Eficiencia por bloqueo

La eficiencia por bloque es uno de los parámetros importantes que afectan la recepción de señales radioeléctricas, también afecta la directividad de las antenas, este fenómeno se presenta debido a las sombras generadas por los alimentadores o supreflectores.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

La eficiencia por bloqueo se puede definir como una relación entre la directividad efectiva de la antena con bloqueo y sin bloqueo.

Apertura circular sin bloqueo.

$$A_{ef} = \pi a^2 \quad (5.73)$$

Apertura circular con bloqueo.

$$A_{ef}^b = \pi(a^2 - b^2) \quad (5.74)$$

Por lo tanto la eficiencia por bloqueo se representa de la siguiente manera.

$$\eta_b = \frac{A_{ef}^b}{A_{ef}} = \frac{a^2 - b^2}{a^2} = 1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2 = 1 - x^2 \quad (5.75)$$

5.7.5 Eficiencia de polarización

La eficiencia por bloqueo se define como la relación entre la potencia radiada en la potencia copolar y la potencia total radiada en ambas polarizaciones.

5.7.6 Eficiencia total

En la eficiencia total se incluyen las pérdidas por radiación fuera del reflector, la iluminación con la apertura, pérdidas de polarización y bloqueos.

$$\eta_t = \eta_s \eta_{il} \quad (5.76)$$

$$\eta_t = \frac{1}{2} \int_0^\beta D(\theta', \phi') d\Omega \left(2 \tan^2 \frac{\beta}{2} \right) \frac{\left[\int_0^\beta \sqrt{D(\alpha) \tan \frac{\alpha}{2}} d\alpha \right]^2}{\int_0^\beta D(\alpha) \operatorname{sen} \alpha d\alpha} \quad (5.77)$$

$$\eta_t = \cot^2 \frac{\beta}{2} \left(\int_0^\beta \sqrt{D(\alpha) \tan \frac{\alpha}{2}} d\alpha \right) \quad (5.78)$$

También se puede encontrar la directividad del reflector mediante la ecuación. (Valero Ferrando Miguel Alejandro, 2015)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$D_p = \frac{4\pi}{\lambda^2} A\eta_t = \frac{4\pi}{\lambda^2} \pi a^2 \cot^2 \frac{\beta}{2} \left(\int_0^\beta \sqrt{D(\alpha)} \tan \frac{\alpha}{2} d\alpha \right)^2 \quad (5.79)$$

5.8 Diseño final de un esquema para la adquisición y procesamiento de señales radioastronómicas en la banda 1420 MHz

En la (tabla 6) se presentan la medidas más representativas para el diseño final de un esquema para la adquisición y procesamiento de señales radioastronómicas en la banda 1420 MHz, además con esto unida a la (imagen 41) estamos cumpliendo con el primer objetivo planteado.

Frecuencia de operación	1420MHz	
Diámetro del monopolo		0.00015 (m)
Longitud del monopolo	0.23λ	$L = \frac{\lambda}{4} = 0.05281$ (m)
Diámetro de la guía de onda	0.68λ	0.1411 (m)
Longitud de la guía de onda	$0.76\lambda_g$	0.29336 (m)
Posición del anilla de bloqueo para la guía de onda	0.15λ	0.0316 (m)
Profundidad del anilla de bloqueo para la guía de onda	0.62λ	0.09495 (m)
Radio del anillo de bloqueo para la guía de onda	0.45λ	0.1266 (m)
Diámetro del plato parabólico (Dp)	-----	5 (m)
Foco del plata parabólico (f)	-----	1.953 (m)
Profundidad de plato parabólico (C)	$c = \frac{D_p}{16(\frac{f}{D})}$	0.8 (m)
Eficiencia del palto parabólico (f/D)	-----	0.39
Área total del plato parabólico (A)	-----	
Área efectiva de plato parabólica	$A_{efc} = \frac{\pi D_p^2}{4}$	19.635 (m ²)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Máxima ganancia del plato parabólico sin eficiencia	$G = \left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2$	5542.106
Angulo de inclinación	$\theta_0 = 2 \tan\left(\frac{1}{4 \frac{f}{D}}\right)$	65.247 grados

Tablas 6. Medidas físicas de la antena bocina circular con alimentación de monopolo.

5.8.1 Simulación de reflector con antena bocina circular

El diseño de que se muestra en la Imagen 42 se realizó con el objetivo de entender como la onda plana que incide es reflejada para concentrar la potencia recibida en un punto específico, para luego poder tener una excitación de apertura en forma de onda con una alta directividad.

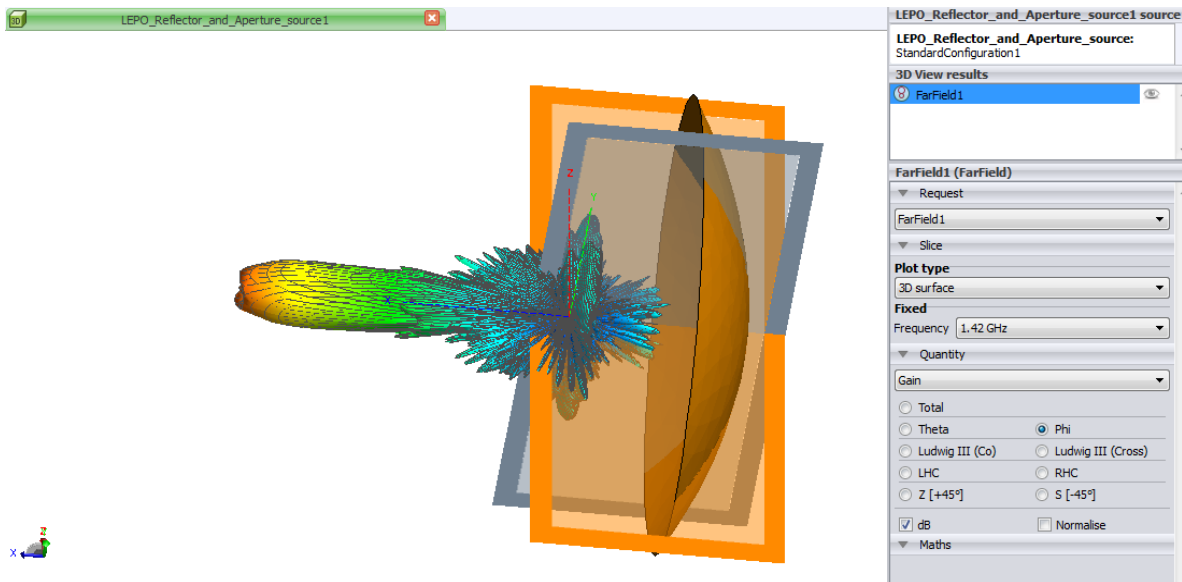


Imagen 41. Simulación de reflector con antena bocina en 1420MHz.

En la Imagen 43 se puede apreciar como quede formado el patrón de radiación del plato paraboloide integrado con una antena en forma de guía de onda, además se muestra la dirección donde se concentra la máxima ganancia del reflector parabólico.

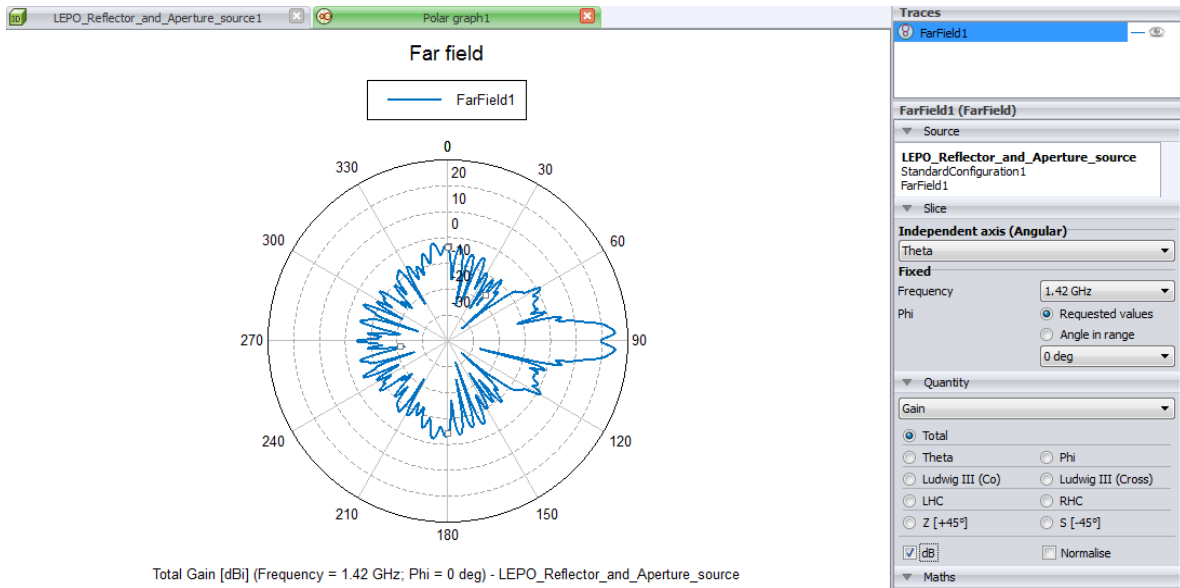


Imagen 42. Patrón de radiación en coordenadas polares de reflector.

En la Imagen 44 se puede apreciar el patrón de radiación en coordenadas cartesianas del reflector con antena bocina, en la cual se puede apreciar donde se encuentra concentrada la mayor directividad del sistema simulado.

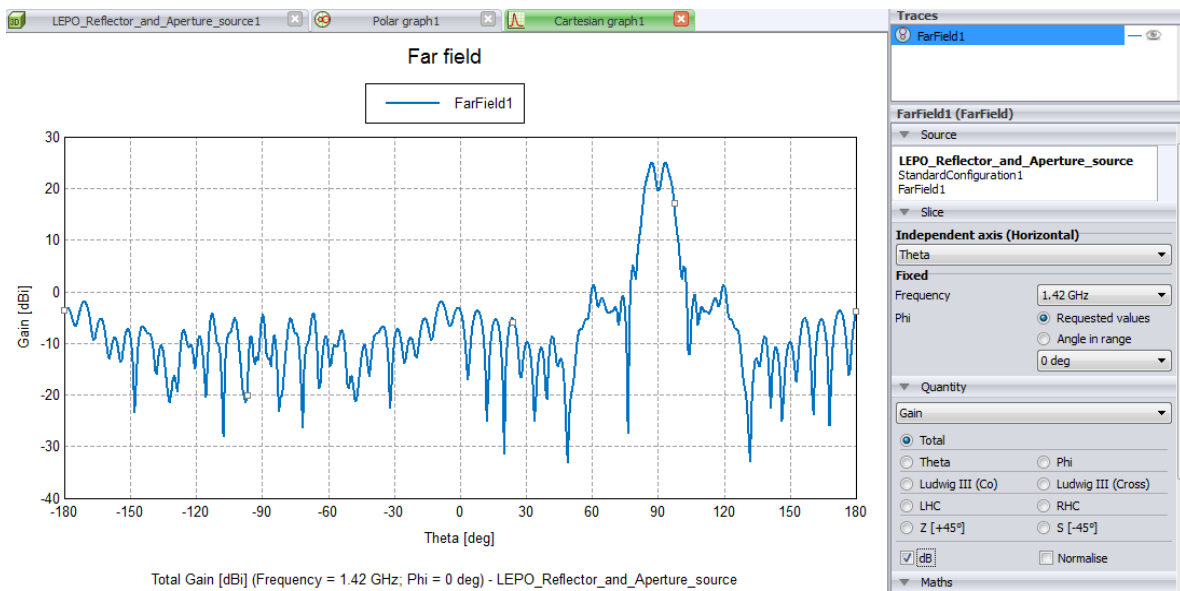


Imagen 43. Patrón de radiación en coordenadas cartesianas de reflector.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5.8.2 Simulación de reflector con antena bocina circular y anillo de bloqueo de bloqueo

En la Imagen 45 se tiene una representación completa del diseño del reflector parabólico integrado a la antena bocina circular con anillo de bloqueo, para el esquema de adquisición de señales radioastronómicas ubicado en la frecuencia de 1420MHz, se puede apreciar como funcionara el sistema al ser iluminada por onda plana, se ve como una onda incidente es reflejada para concentrar la potencia recibida y poder tener una excitación de apertura en forma de onda, con una alta ganancia máxima de 30 dB.

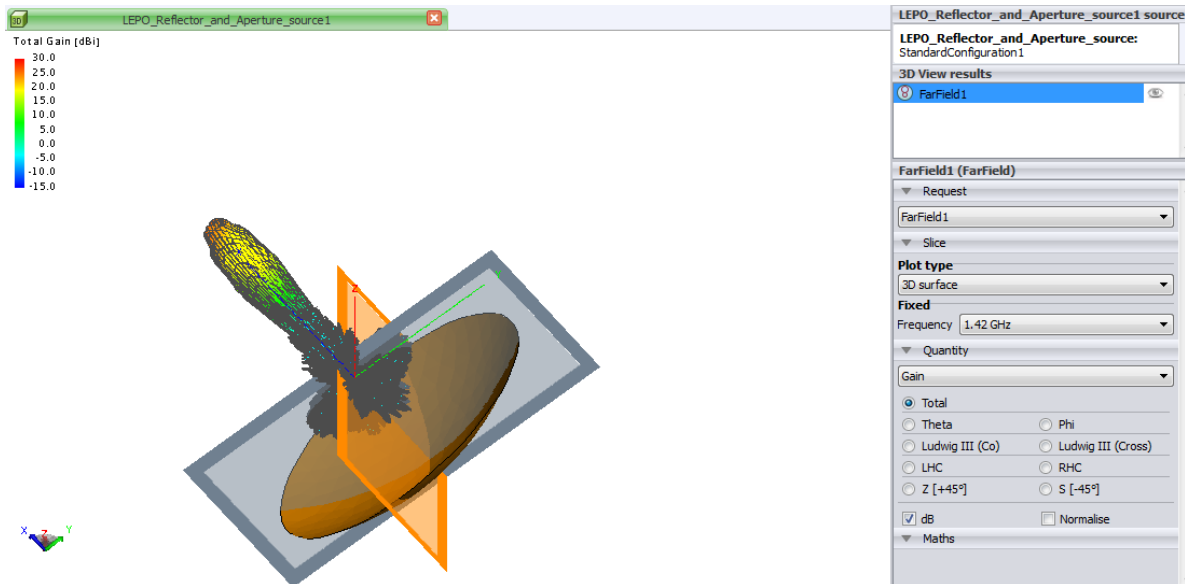


Imagen 44. Simulación de reflector con antena bocina y anillo de bloqueo para la frecuencia de operación de 1420MHz.

Se puede observar en Imagen 46 como quede formado el patrón de radiación en coordenadas polares del reflector integrado con una antena en forma de guía de onda y un anillo de bloqueo, además se presenta la forma como se concentra la ganancia del reflector.

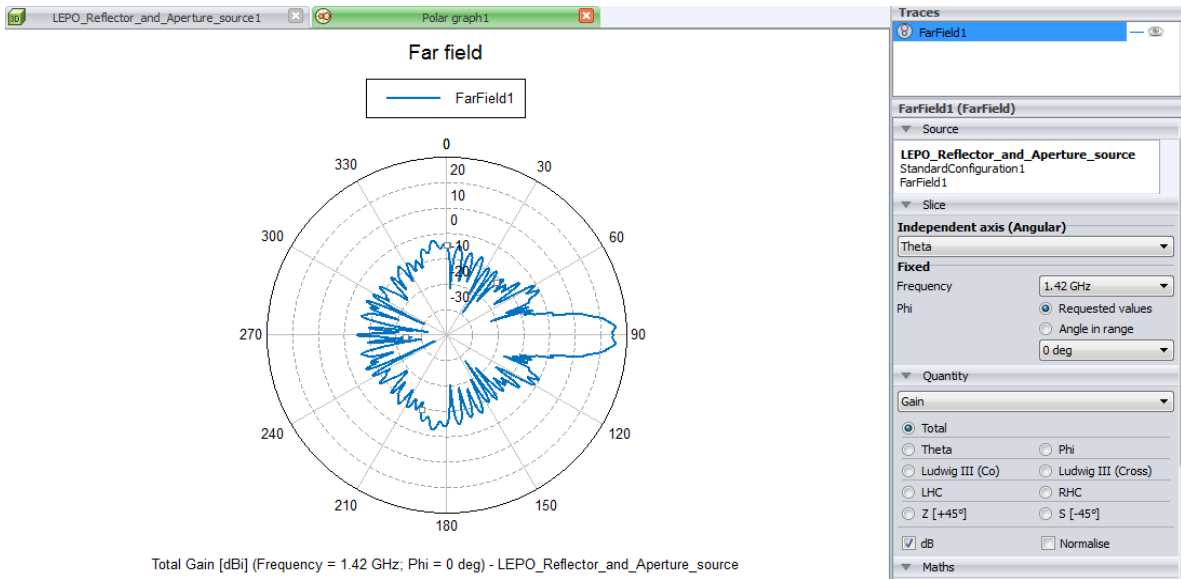


Imagen 45. Patrón de radiación en coordenadas polares de reflector con antena bocina y anillo de bloqueo.

En la Imagen 47 se puede apreciar el patrón de radiación en coordenadas cartesianas del reflector con antena bocina y anillo de bloqueo, en la Imagen cual se puede ver que tan directivo es el sistema simulado.

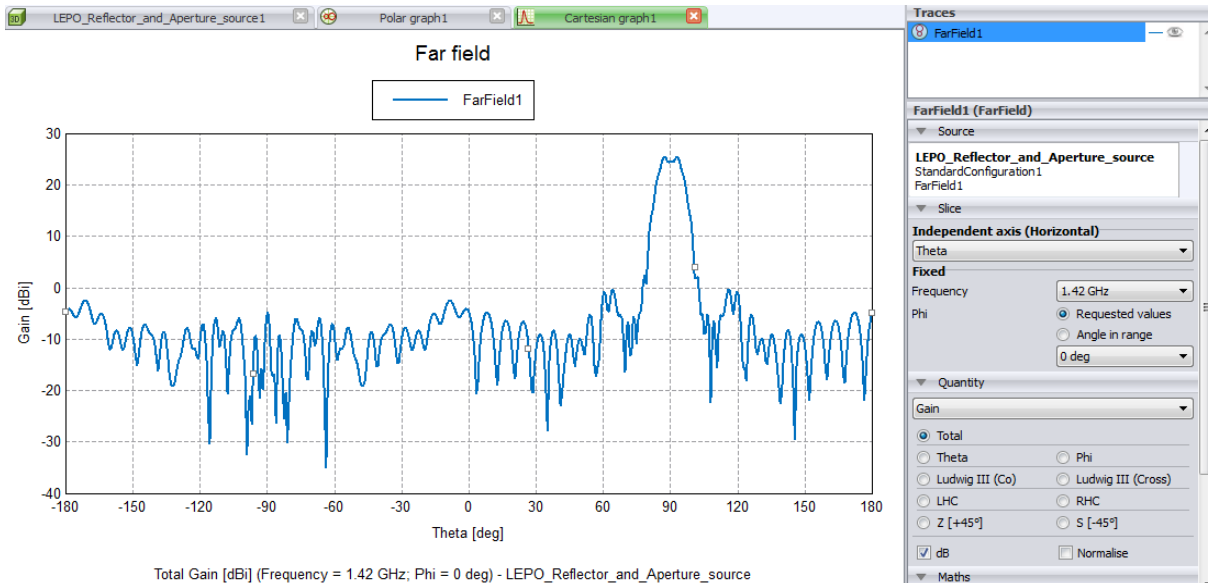


Imagen 46. Patrón de radiación en coordenadas cartesianas de reflector con antena bocina y anillo de bloqueo.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Un radio telescopio es un sistemas diseñado para recibir radiación utilizando una superficie parabólica que direcciona las señales a un punto específico llamado foco, donde se ubica la antena, en esta parte la onda incidente genera una inducción de corriente débil la cual será pasada atreves de dispositivos electrónicos que permiten la amplificación y registro de la señal para ser pasada a la etapa de procesamiento donde se analizan los datos.

En un radio telescopio se pueden tener fundamentalmente dos tipos de fuentes emisoras que proporcionan los datos.

- Señales radiadas por cuerpos y elementos celestes.
- Señales que se envían de la tierra y son reflejadas por cuerpos celestes cercanos, el cual funciona como un radar.

Con esto sistemas la radioastronomía ha descubierto los cuásares, los pulsares, las galaxias activas, el fondo cósmico de microondas, la mayor parte de las moléculas interestelares. Además de esto con las observaciones hechas con radiotelescopio se a podio pensar en la presencia de materia oscura en el Universo, se han hecho estudios detallados del Sol, mapas de planetas, entre otras cosas.

El radiotelescopio diseñado que se muestra en la Imagen 47 es para captar líneas espectrales del hidrogeno neutro es sistema que cuenta con un plato parabólico de 5m de diámetro, una antena bocina circular con un anillo de bloque y alimentado mediante sonda (antena monopolo) ubicada en el foco, lo anterior es la etapa de recepción de señal y las medidas tanto de la antena como del plato parabólico se encuentran consignadas en la tabla 6.

Para la etapa de procesamiento de señales se cuenta un receptor de televisión digital RTL-SDR, que será el encargado de convertir la señal capturada de la antena en una señal digital que pasara al software GNU Radio con aplicaciones de procesamiento de señales para realizar el análisis de los datos muestreados.

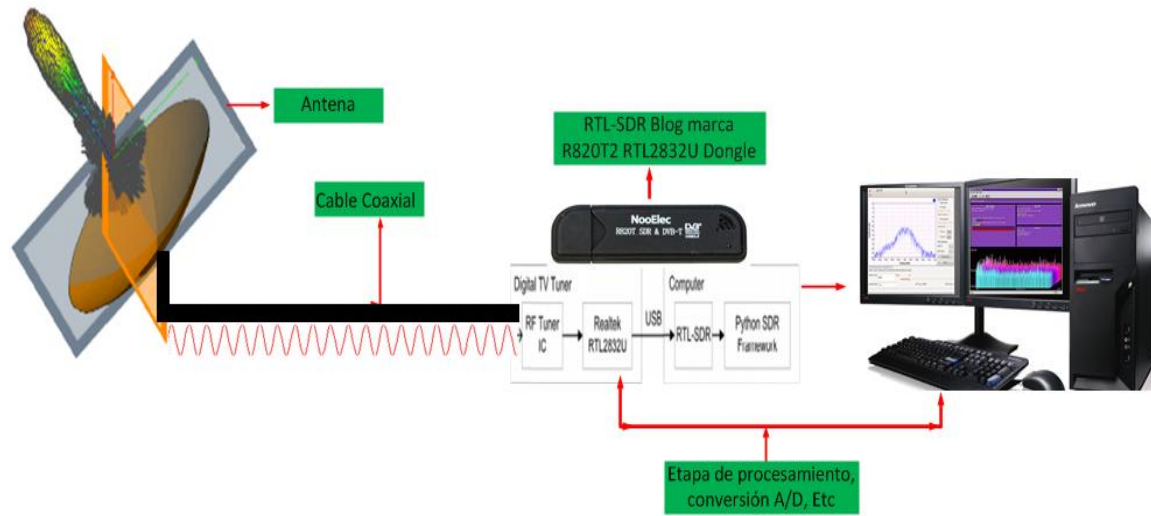


Imagen 47. Esquema de adquisición de señales de radioastronomía en 1420MHz.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Capítulo 6

Procesamiento de señales mediante GNU Radio

En este capítulo se realiza la conceptualización del procesamiento de señales utilizando el software GNU Radio, el cual permite simplificar el procesamiento de los datos con muestreos en tiempo real. Además se presentara la estructura de las aplicaciones atizadas por el SDR para realizar el procesamiento de señales digitales en radioastronomía.

6.1 Sistema de adquisición de señales

El sistema de procesamiento de señales está conformado normalmente por un conjunto de amplificadores y filtros que acondicionan y pre-procesan la señal eléctrica para luego con algunas técnicas de DSP obtener determinada información la cual se requiere en alguna investigación.

Para nuestro diseño se utiliza un RTL-SDR Blog marca R820T2 RTL2832U Dongle (ver imagen 48) el cual es de captura directa (capturan la señal directamente a la frecuencia que es emitida). Este dispositivo se conecta a través del puerto USB usando el software Gnu-radio y la aplicación “Simple_Ra” implementada para el sistema de procesamiento de señales a 1420 MHz. Para las pruebas se tiene en cuenta los datos proporcionados de la antena del radiotelescopio del IAR en Argentina.



Imagen 48. RTL-SDR Blog marca R820T2 RTL2832U Dongle (<http://www.amazon.com/RTL-SDR-Blog-RTL2832U-Software-Telescopic/dp/B00QFCNNV0>)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

6.2 Procesamiento Digital de Señales (DSP)

El procesamiento digital de señales (DSP) se ocupa de: “la representación, transformación y la manipulación de señales y de la importancia que estas contienen”. (Smith Steven, 1999)

El procesamiento de señales es una tecnología que se encuentra fuertemente ligada a un gran conjunto de especialidades entre las que se encuentran las telecomunicaciones, la electrónica, la mecatrónica, la exploración del espacio, la medicina, la arqueología, entre otras.

6.2.1 ¿Qué es Procesamiento Digital de Señales?

Es un procedimiento que transforma señales de fuentes del mundo real (generalmente de forma analógica), en datos digitales que pueden ser analizados. Dicho análisis es realizado en forma digital una vez que la señal ha sido reducida a valores numéricos discretos. Sus componentes pueden ser aislados, analizados y reordenados más fácilmente que en su primitiva forma analógica.

DSP es una operación o más bien, la transformación de una señal a través de un hardware según reglas bien definidas, las cuales son introducidas a través de un software específico que puede operar con lenguajes de programación tanto de alto como de bajo nivel. (A & Fuerst Wolfgang, 1999)

6.2.2 Señales

Para determinar las tareas realizadas por el DSP se requiere ante todo precisar el concepto de señal, definida como toda observación de una magnitud física en función de variables independientes de tiempo y espacio, elaborada de un modo que esta señal contenga información de los procesos observados. En el contexto del procesado digital de señales

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

muchas de las señales proceden de medidas del mundo real (sonidos, temperatura, luz, etc.) siendo estas en su gran mayoría analógicas. El procesado digital no puede operar directamente con estas señales por lo que es necesaria una conversión de las mismas; los procesos de muestreo y cuantificación realizan esta tarea.

Generalmente, todas las señales contienen información la cual se desea extraer o modificar de acuerdo a los requisitos de cada aplicación en concreto.

6.2.3 Sistemas

La palabra sistema expresa una colección o conjunto de elementos interrelacionados que conforman un todo unificado. Este puede ser un segmento de otro sistema de nivel superior; en tal caso, al primero se le nombra subsistema del segundo. Los diferentes subsistemas intercambian información, materia o energía para lograr un objetivo específico.

Los términos señales de entrada o de salida se utilizan para abstraer ese flujo de información, materia o energía en el concepto matemático de funciones. El sistema entonces puede interpretarse como un conjunto de subsistemas que consiguen transformar una señal en otra. Los dispositivos pueden ser implementados físicamente como un circuito electrónico o como algoritmos implementados en software.

Se dice que un sistema procesa una señal si la señal de salida tiene las mismas características semánticas de la entrada: por ejemplo, si la entrada representa una señal de voz, la salida de un sistema procesador será también voz aunque quizás modificada para cumplir ciertos requisitos de la aplicación. Se dice que un sistema realiza análisis de la señal, si la salida tiene otra naturaleza semántica a la entrada.

6.3 Historia DSP

Dado que el procesamiento digital de una señal sólo demanda efectuar determinados cálculos a partir de los datos disponibles, y que en muchas ocasiones dichos cálculos pueden

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ser efectuados en forma manual, podemos afirmar que DSP se practicó durante varios siglos, mucho antes de la aparición de los computadores, en situaciones tales como el análisis y la predicción del movimiento de cuerpos celestes, o en el análisis y la predicción de las mareas.

Uno de los primeros desarrollos formales en DSP fue el artículo “Certain topics in Telegraph Transmission Theory”, publicado por Harry Nyquist en 1928. En este artículo se presentó el efecto producido en el espectro de frecuencia de una señal análoga al ser discretizada en el tiempo, y se planteó que para salvaguardar la información original la tasa de muestreo debía ser mayor que el doble de la máxima componente de frecuencia contenida en la señal análoga. Consecutivamente, en 1949, Claude Shannon publicó el artículo “Communications in the Presence of Noise”, donde demostró que es posible reconstruir perfectamente una señal análoga a partir de sus muestras, si se dispone de un filtro pasabajos análogo ideal. Si bien no es posible fabricar un filtro de este tipo es posible aproximarse bastante.

El procesamiento digital de una señal demanda en muchos casos la realización de un gran número de cálculos, haciéndolo imposible si no se dispone de una máquina calculadora de gran velocidad o de un computador. Este problema dificultó el avance en el área de DSP hasta los años 60 y 70, época en la cual progresó rápidamente gracias a la disponibilidad de grandes computadores (mainframes) en las instituciones. Algunos de los tópicos abordados fueron:

- Diseño e implementación de filtros digitales.
- Invención y optimización del algoritmo de la FFT.
- Compresión de voz.
- Procesamiento de imágenes (fotos tomadas por satélites y naves espaciales).
- Sismología (búsqueda de minerales y de petróleo).

En esa época las aplicaciones de DSP al procesamiento de señales en tiempo real (tales como radar, sonar, cancelación de ecos, módems) eran muy limitadas. Los procesadores

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

DSP se fabricaban con centenares de circuitos integrados TTL, tenían un costo prohibitivo (excepto para aplicaciones militares) y eran muy complejos. Por lo tanto, la mayoría de los trabajos consistían en desarrollar y ensayar algoritmos en los grandes computadores que poseían las universidades, empresas y otras instituciones. La capacidad de efectuar multiplicaciones en forma rápida es el requerimiento más importante para poder realizar algoritmos de DSP en tiempo real. Las CPUs de esa época no eran capaces de multiplicar en forma directa, sino que lo hacían en base a sumas y desplazamientos. La multiplicación en hardware requería de una gran área en la pastilla de silicio. A principios de los años 80 se logró reducir el tamaño de los transistores lo suficiente como para poder fabricar un procesador DSP capaz de multiplicar 2 números en 1 ciclo de máquina (800 nseg). Con el progreso de la tecnología de integración, este tiempo ha disminuido actualmente a unos pocos nanosegundos. El desarrollo de conversores A/D y D/A cada vez más rápidos, de mayor resolución (Nº de bits), menor tamaño y menor costo, también ha contribuido a reemplazar el procesamiento análogo por el procesamiento digital. El progreso en la velocidad de cálculo de los microcomputadores personales (PC) ha permitido usarlos en tareas cada vez más exigentes, tales como grabación y reproducción de audio y video, procesos que deben efectuarse en tiempo real. Los primeros computadores personales, fabricados a finales de los años 70, sólo podían efectuar algunos centenares o miles de operaciones de punto flotante por segundo (flops). La velocidad de cálculo de los PC actuales ya ha superado los mil millones de flops. Muchos equipos electrónicos complejos se construyen actualmente usando como base un PC industrial, aprovechando el bajo costo del hardware y del software asociado. (Barchiesi J, 2008)

6.3.1 Ventajas del procesamiento digital

¿Por qué aplicar el DSP a las nuevas tecnologías? y ¿Por qué los sistemas de hoy en día utilizan el DSP? Algunas respuestas a estos interrogantes pueden ser las siguientes:

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Ofrece mayor facilidad para ser recuperada, en comparación con las señales análogas. En la imagen 49 se ilustra un pulso digital binario ideal que se propaga a través de una línea de transmisión. Se puede ver como la distorsión puede afectar una señal analógica, generando una forma de onda absurda, también se aprecia cómo puede ser recuperada si se digitaliza.

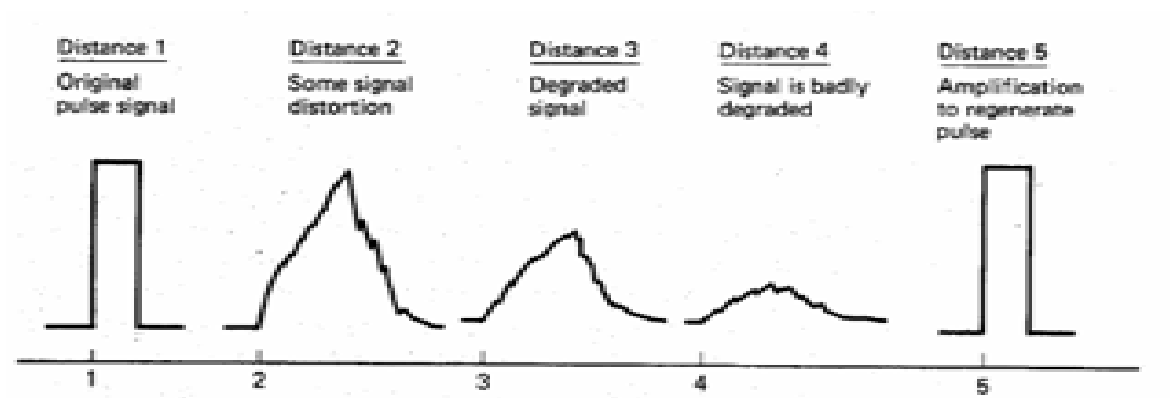


Imagen 49. Degradación de un pulso binario. (Sklar Bernard, 2001)

- Variaciones en la forma. Con los circuitos analógicos, una gran distorsión puede dar una reproducción de la onda con una distorsión inimaginable. Una vez que la señal analógica está distorsionada, la distorsión no puede ser depurada por los amplificadores.
- Además la inserción de ruido en sistemas analógicos es irrecuperable, y esta no puede ser perfectamente regenerada. Con las técnicas digitales, se produce una tasa de error extremadamente baja, produciendo una señal de alta fidelidad con posibilidad de detección de error y corrección por un proceso similar que no es compatible con los analógicos.
- Las comunicaciones digitales son más seguras y pueden ser producidas a un costo más bajo que los circuitos analógicos.
- Diferentes tipos de señales digitales pueden ser tratadas con señales similares y ser transmitidas y transmitidos bit a bit. Estos mensajes digitados pueden ser transmitidos en grupos autónomos denominados paquetes. La técnica digital presenta condiciones

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

naturales para el procesamiento de la señal que protegen de interferencia (jamming) o para proveer encriptación y privacidad. También, aplica en comunicaciones entre computadoras y entre un instrumento digital o un terminal para computación.

- El tiempo de los componentes y las derivas térmicas no afectan el resultado del proceso.
- Todos los dispositivos fabricados se comportan de forma idéntica, debido a que la tolerancia de los componentes no influye en el procesamiento. La tolerancia de los componentes en un sistema análogo hace que esto sea una dificultad para el diseñador al controlar la exactitud de la señal de salida análoga. Por otro lado, la exactitud de la señal de salida para un sistema digital es predecible y controlable por el tipo de aritmética usada y el número de bits usado en los cálculos.
- Las señales digitales pueden ser almacenadas en un disco flexible, Disco Duro o CD-ROM, sin la pérdida de fidelidad más allá que el introducido por el convertidor Análogo Digital (CAD). Esto no aplica para las señales análogas. (Sklar Bernard, 2001)

6.4 Modelos Matemáticos y Algoritmos para Procesamiento de Señales

El procesamiento digital de señales se ha convertido en un área relevantemente rica en conocimientos, métodos y aplicaciones debido esencialmente a la elevada tecnología relacionada con los computadores y diseños de equipos digitales (analizadores de señales, colectores de datos, tarjetas de adquisición de datos, grabadores multicanal, osciloscopios digitales, filtros, etc.), los cuales combinados con las nuevas técnicas de análisis han generado nuevas formas para llevar adelante estudios de problemas cada vez más complejos en todos los campos.

Gracias a todos estos modelos se han podido realizar nuevos aportes al conocimiento astronómico.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

6.4.1 Teorema de muestreo de Shannon & Nyquist

Este teorema es de gran importancia para el procesamiento digital de señales pues establece las restricciones necesarias para garantizar una correspondencia única entre las señales analógicas y sus respectivas señales discretas. De esta manera se puede realizar el procesamiento digital de una señal en un computador para luego reconstruir la señal analógica sin (o con la menor) pérdida de información. Este teorema fue demostrado matemáticamente por Claude E. Shannon en 1949, sin embargo fue propuesto por Harry Nyquist en 1928. (Jeremy Norman & Co., Inc., 2015)

Las señales son en gran parte de naturaleza analógica; es decir, existe un valor determinado de la señal para cualquier instante de tiempo. Esto implica que para procesar una señal continua $X_a(t)$ en un computador, se necesitaría una memoria infinita inclusive si se analizara la señal en un intervalo acotado de tiempo. Entonces es necesario tomar muestras de la señal en el intervalo de tiempo en que esta se desea analizar. Estas muestras se toman generalmente durante determinado tiempo t , lo que se conoce como tiempo de muestreo, generando así una señal discreta $x(n)$:

$$x(n) = x_a(nt) \quad \forall n = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (6.1)$$

Donde N es el número de muestras de la señal analógica $x_a(t)$.

Para efectuar el análisis de $x_a(t)$ con sólo algunas muestras de ésta, inicialmente es necesario asegurar que la señal pueda reconstruirse sin ambigüedad a partir de sus muestras. El teorema de Nyquist indica la relación entre tiempo de muestreo y la frecuencia de la señal que asegura que la señal analógica se pueda reconstruir.

En concreto, una señal $x_a(t)$ de banda base con un ancho de banda BW puede ser reconstruida a partir de sus muestras tomadas con una frecuencia de muestreo F_s si se cumple lo siguiente:

$$F_s \geq 2BW \quad (6.2)$$

En otras palabras si F_s es menor que el doble del ancho de banda de $x_a(t)$ la señal analógica reconstruida a partir de las muestras (n) será distinta de $x_a(t)$. Este efecto de ambigüedad

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

se conoce como efecto *aliasing* y en algunos casos podría hacer perder información. Por ejemplo, si una señal de banda base se muestrea a una tasa menor que el doble de su frecuencia de muestreo, al procesarla en un computador y luego reconstruirla habrá ruido adherido a la señal. En estos casos hay que evitar este efecto. (Smith Steven, 1999)

6.4.2 Transformada Discreta de Fourier (DFT)

Entre los años 1670 y 1672 Isaac Newton mostró que un prisma podía descomponer la luz del sol en colores. A esta banda de colores Newton le dio el nombre de espectro. Este proceso de descomposición de la luz blanca en colores es llamado análisis de frecuencia. La transformada de Fourier es una herramienta matemática que en cierto sentido realiza lo mismo que el prisma ya que descompone la señal analizada en todas sus frecuencias, permitiendo así conocer por ejemplo como se distribuye la energía de la señal. La gran mayoría de las señales de interés práctico se pueden descomponer en una suma de sinusoides. Cuando la señal a descomponer es periódica se habla de serie de Fourier. Para señales aperiódicas en cambio este proceso se denomina transformada de Fourier. Si la señal a ser analizada es discreta, la transformada de Fourier pasa a llamarse transformada discreta de Fourier o DFT por sus siglas en inglés (*Discret Fourier Transform*). Si la señal analógica $x_a(t)$ es muestreada satisfaciendo el criterio del teorema de Shannon y Nyquist para obtener la señal discreta $x(n)$, entonces la DFT de $x(n)$ se puede obtener a partir de la transformada de Fourier de $x_a(t)$, de esta manera el análisis realizado a partir de cualquiera de las dos transformadas es equivalente.

En general, una señal aperiódica discreta $x(n)$ infinita, tiene transformada de Fourier $X(\omega)$ continua y periódica de periodo 2π dada por

$$X(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n) \cdot e^{-j\omega n} \quad (6.3)$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Al ser periódica, $X(\omega)$ queda completamente determinada en un periodo. La ecuación (6.4) muestra que si se toman N muestras de $X(\omega)$ entre 0 y 2π lo que resulta es la transformada discreta de Fourier $X(k)$ (asumiendo condiciones de Shannon-Nyquist).

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-j2\pi kn/N} \quad \forall k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (6.4)$$

La ecuación (6.4) es conocida como ecuación de análisis. Igualmente si se quiere reconstruir $x(n)$ a partir de $X(k)$ se tiene la ecuación (6.5) conocida como ecuación de síntesis.

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \cdot e^{j2\pi kn/N} \quad \forall n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (6.5)$$

De esta manera, si se tiene una secuencia $x(n)$ de largo N la cual puede estar formada por valores complejos entonces la *DFT* de esa secuencia es también una secuencia $X(k)$ de N valores complejos. De acuerdo a lo anterior se tiene que todos los valores son complejos como lo muestran las ecuaciones (6.5) y (6.6).

$$x(n) = x_R(n) + jx_I(n) \quad (6.5)$$

$$X(\omega) = X_R(\omega) + jX_I(\omega) \quad (6.6)$$

Si $x(n)$ es real (i.e., $x_I(n) = 0$) se cumple que $X(\omega)$ es simétrica; es decir, asumiendo que la señal es real y utilizando esto en la ecuación (6.3) se llega a las siguientes relaciones

$$|X(\omega)| = |X(-\omega)| \quad (6.7)$$

$$\angle X(-\omega) = -\angle X(\omega) \quad (6.8)$$

Por lo tanto se puede concluir que si $x(n)$ es real entonces $X(\omega)$ queda completamente caracterizada en la mitad de su periodo. En concreto cualquier intervalo de largo π es suficiente para obtener toda la información contenida en $X(\omega)$. Esto equivale a decir, como lo indica la ecuación (6.9) que solo $\frac{N}{2}$ valores de $X(k)$ son necesarios para obtener toda la información.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-j2\pi kn/N} \quad \forall k = 0, 1, \dots, \frac{N}{2} - 1 \quad (6.9)$$

De la ecuación (6.9) se deduce que la frecuencia angular ω está dada por:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi k}{N} \quad (6.10)$$

Donde f se define como

$$f = \frac{F}{F_s} \quad (6.11)$$

De la ecuación (6.10) se deduce que

$$f = \frac{k}{N} \quad (6.12)$$

Y reemplazando (6.11) en (6.10) resulta una expresión para la frecuencia analógica F correspondiente a cada valor k

$$F = \frac{F_s k}{N} \quad (6.13)$$

siendo $F_s = \frac{1}{T}$ la frecuencia de muestreo. Lo que significa que los $\frac{N}{2}$ valores de $X(k)$ corresponden cada valor a una frecuencia F entre 0 y $\frac{F_s}{2}$. Específicamente si F_s se mide en *Hertz* se tiene que a cada punto de la DFT le corresponde una frecuencia específica dada por las siguientes relaciones.

$$X(0) \rightarrow 0 \text{ [Hz]} \quad (6.14)$$

$$X(1) \rightarrow F_s * \frac{1}{N} \text{ [Hz]} \quad (6.15)$$

$$X(2) \rightarrow F_s * \frac{2}{N} \text{ [Hz]} \quad (6.16)$$

⋮

$$X\left(\frac{N}{2} - 1\right) \rightarrow F_s * \frac{\frac{N}{2} - 1}{N} = \frac{F_s}{2} * \frac{N - 2}{N} \text{ [Hz]} \quad (6.17)$$

Estos $\frac{N}{2}$ puntos de la DFT definidos en (6.17), son también conocidos como canales en un espectrómetro digital y cada uno representa una frecuencia específica de la señal analógica. (Smith Steven, 1999)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

6.5 Transformada Rápida de Fourier (FFT)

Existen algoritmos óptimos para realizar el cálculo de la DFT. Estos algoritmos utilizan propiedades matemáticas de la función exponencial compleja $e^{-j2\pi kn/N}$ en la ecuación (6.3) reduciendo significativamente el costo en operaciones matemáticas necesarias. Los algoritmos que ocupan estas propiedades de simetría y periodicidad se llaman FFT (*Fast Fourier Transform*) y basan su funcionamiento en realizar el cálculo de la DFT en etapas o *stages*, en donde cada etapa consiste en una DFT más pequeña. Cuando el largo de la DFT es una potencia de 2 este algoritmo se llama radix-2 FFT. Por ejemplo una DFT de largo $N=1024$ requiere de $N^2 = 1048576$ multiplicaciones para el cálculo directo, mientras que para la FFT se requieren solo $(\frac{N}{2})\log_2(n) = 5120$ multiplicaciones, lo que implica una mejora en la velocidad de computo de 204,8 veces. (Smith Steven, 1999)

6.5.1 Modelos matemáticos Actuales

Recientemente, se han desarrollado modelos matemáticos para el tratamiento de señales en dos y tres dimensiones. Se han propuesto nuevos algoritmos para la resolución de problemas importantes en procesamiento de imágenes como son la separación ciega de fuentes (Blind Source Separation BSS), descomposiciones tensoriales y censado comprimido multidimensional.

6.5.2 Separación Ciega de Fuentes (Blind Source Separation BSS)

La separación Ciega de Fuentes (BSS) es una técnica para estimar componentes de código individuales de sus mezclas en múltiples sensores. Se llama ciega porque no utilizamos cualquier otra información además de las mezclas. BSS tiene aplicaciones en el procesamiento de imágenes satelitales, en la separación de fuentes de radiación en Radioastronomía y muchas otras áreas.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

La separación se dice que es "ciega" ya que se desconocen los coeficientes con los que se adquieren las mezclas, debido a esto, es necesario aprovechar propiedades de las fuentes y diseñar algoritmos para estimarlas a partir de sus mezclas únicamente. A menudo las fuentes pueden ser consideradas estadísticamente independientes. En este caso, durante los últimos años se han propuesto numerosos algoritmos agrupados bajo el nombre de "Análisis de Componentes Independientes" (Independent Component Analysis - ICA). (Comon Pierre, 1994)

No obstante, en una gran variedad de aplicaciones prácticas, la condición de independencia de las fuentes no es válida y deben estudiarse otras propiedades de las fuentes para desarrollar algoritmos de separación. En este último caso, los métodos se denominan de "Análisis de Componentes Dependientes" (Dependent Component Analysis - DCA). (Nascimento Jose, 2004)

En particular, DCA puede ser aplicado a las siguientes situaciones:

- Estimación de los porcentajes de ocupación de materiales por pixel en la superficie terrestre a partir de imágenes satelitales hiper-espectrales.
- Separación de fuentes de radiación en imágenes astrofísicas, puntualmente, se estudia el desarrollo de algoritmos para separar la señal del ruido cósmico o CMB ("*Cosmic Microwave Background*") de otros tipos de radiación. Éste es un problema real que se encuentra a la hora de analizar los datos capturados.

6.5.3 Descomposiciones Tensoriales

Las señales multidimensionales o tensores aparecen espontáneamente en las aplicaciones de la Neurociencia y/o Astronomía. Por ejemplo, una imagen 3D producida por tomografía computada (CT) o resonancia magnética (MRI) corresponde al muestreo de una función $f(y_1, y_2, y_3)$ y cada modo corresponde con una dirección específica en el espacio (dimensión).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Las señales multidimensionales que se hallan en la práctica por lo general tienen una fuerte estructura interna, por ejemplo, están compuestas por la superposición de variaciones suaves de valores de intensidad y regiones de alto contraste (bordes). Una forma de poner en evidencia las estructuras presentes en los datos es valorar modelos en los cuales un tensor puede ser expresado como un producto de un tensor con una estructura determinada y varias matrices correspondientes a cada dimensión. El objetivo es estudiar distintas formas de descomponer tensores en elementos constitutivos más simples que atrapen la información esencial de los datos y desarrollar algoritmos para calcular estas representaciones a partir de los datos.

6.5.4 Censado Comprimido Multidimensional

En la actualidad, se ha observado que las señales no cubren uniformemente el espacio en el cual coexisten ni tampoco se restringen a un subespacio del mismo, no obstante, se pueden expresar como una combinación lineal de unos pocos elementos de una base conocida del espacio (Diccionario). Tal observación aparece básicamente de realizar una transformación especial de la señal, por ejemplo utilizando una base tipo Wavelet, y observar que los coeficientes obtenidos concentran su energía en unos pocos coeficientes. En este sentido se dice que la señal en cuestión tiene una representación sparse (representación económica) en la base Wavelet (Diccionario).

La Teoría del Sensado Comprimido (Compressed Sensing) recientemente desarrollada, propone algoritmos que permiten rescatar señales con una representación sparse a partir de información limitada de las mismas. Esta teoría generaliza la teoría clásica del muestreo de Shannon y permite, en algunos casos, recuperar señales aun en el caso en el que el criterio de muestreo de Nyquist no se cumpla.

Otra característica que se encuentran en las señales de interés es su naturaleza multidimensional la cual debe considerarse a la hora de construir modelos matemáticos. Para ello, se recurre a modelos para datos tensoriales, en especial, se utilizan

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

factorizaciones tensoriales desarrolladas en matemáticas. Así como la teoría del Sensado Comprimido (*compressed sensing*) explota la representación sparse de señales unidimensionales (vectores), se utilizan las propiedades de las representaciones sparse de tensores (datos con estructura multidimensional) para el diseño de algoritmos de procesamiento de señales eficientes. Se desarrollan modelos matemáticos de señales multidimensionales haciendo uso del modelo de Tucker donde los diccionarios tienen una estructura de Kronecker. Se estudian las propiedades de estos diccionarios estructurados, se desarrollan algoritmos eficientes para la búsqueda de diccionarios óptimos y para el cálculo de las representaciones sparse correspondientes. Se estudia la reconstrucción de señales multidimensionales a partir de datos incompletos generalizando algoritmos existentes en el caso unidimensional (vectores) y bidimensional (matrices) al caso multidimensional (tensores). (Jonina, 2012)

6.6 Radio definido por software (SDR)

SDR es una tecnología diseñada para mejorar la interoperabilidad entre diferentes sistemas de comunicaciones inalámbricas. Este avance tecnológico está compuesto de hardware y software, el cual puede ser reconfigurado dinámicamente para habilitar comunicaciones entre una amplia variedad de normas de comunicaciones, protocolos y radio enlaces. SDR permite diseñar una gran variedad de dispositivos inalámbricos y equipo de redes multibanda y multifuncionales, que pueden ser dinámicamente reconfigurados o a través de actualizaciones de software y reconfiguraciones de hardware.

6.6.1 ¿Qué es Radio Definido por Software?

Según la IEEE radio definido por software (SDR), es un radio en el cual algunas o todas las instrucciones de la capa física son realizadas por software, es decir, tareas tales como amplificación, modulación, demodulación y filtrado de señales de radio son manipuladas en el dominio digital por programas que pueden ejecutarse sobre computadores de propósito

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

general. Normalmente lo que se busca es optimizar el diseño de la etapa frontal de radiofrecuencia del radio para obtener una señal que pueda ser fácilmente tratada por un computador. Para lograr esto se implementan conversores de analógico a digital y viceversa en arquitecturas de hardware reconfigurables de alto desempeño como los FPGA con el objetivo de reducir el tamaño y costo de los circuitos. La ventaja de un SDR es que este puede recibir y transmitir nuevos protocolos de comunicaciones simplemente mediante la actualización de software sobre el hardware existente, evitando incurrir en el cambio total de la infraestructura de comunicaciones que ya se encuentra implementada.

Como un ejemplo más sencillo podemos imaginar un teléfono celular de segunda generación siendo actualizado a tercera generación solo con el cambio de su firmware. (Mitola III J, 2001).

6.6.2 Objetivo Tecnológico del SDR

El SDR procura sustituir todas las funciones analógicas por funciones digitales, buscando como objetivo final conectar un equipo totalmente digital entre la antena que hace de interfaz con el aire y el pc o procesador de señales.

Supongamos un circuito en el que entre otros componentes hay un chip de muy alta velocidad de procesamiento capaz de realizar las labores de todas las etapas usadas en un sistema análogo (filtros, osciladores, mezcladores, amplificadores, etc.) y todo ello lo logra empleando fórmulas y operaciones matemáticas que residen y se efectúan dentro del chip en cuestión.

6.7 Análisis y diseño del sistema de procesamiento de señales

Para poder comprender lo que pretendemos implementar con el RTLSDR necesitamos saber primero la transformación que sufre la señal captada cuando atraviesa las diferentes etapas del back_end, ya que SDR pretende virtualizar tales componentes.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Front_end y Back_end

En un radiotelescopio el front end se refiere a un bloque que contiene a la antena de bocina y a la guía de onda como un requerimiento para que las antenas detecten la señal de radio. Está formado por amplificadores de muy bajo ruido, filtros de RF, la primera etapa mezcladora, los amplificadores y filtros de frecuencia intermedia.

El back_end se refiere al conjunto de subsistemas localizados al final de la cadena receptora, encargados del tratamiento de la señal recibida previamente detectada y convertida a frecuencia intermedia en el front-end, aquí se refina y modifica la señal antes de presentarla al usuario. Está formado por amplificadores y filtros de frecuencia intermedia, segunda etapa mezcladora, mezclador de banda base y el correlador. (IAR, 2015)

Existen distintas clases de back-end:

Los que sólo registran la señal de frecuencia intermedia (FI) con un formato establecido e información adicional de la observación para su posterior tratamiento y análisis, como es el caso de los back_end de VLBI (Very Long Baseline Interferometry).

Los que la detectan y procesan. Lo que procesan se dividen a su vez en dos clases continuo y espectral, según la forma de detección de la señal de frecuencia intermedia.

- El detector de continuo estima la potencia recibida en toda la banda de paso del receptor.
- El detector espectral, también llamado espectrómetro, estima la densidad espectral de potencia, DEP, de la señal de FI dividiendo la banda de paso del receptor en tramos adyacentes y midiendo la potencia recibida en cada tramo. Esto permite, por ejemplo, estudiar las líneas de emisión de los átomos y moléculas del medio interestelar. (Ministerio de Fomento Español, 2015)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

6.7.1 Hardware: Receptor

La función de un receptor para radiotelescopio es localizar y captar las emisiones de radio de fuentes celestes. La mayor parte consiste en radiaciones confusas cuyas propiedades estadísticas no difieren del ruido generado en el receptor por la antena. El nivel de potencia de la señal en los receptores de los radiotelescopios es habitualmente bastante pequeño, en el orden de 10^{-15} a 10^{-20} Vatios pero en algunos casos es mayor, de manera que una alta sensibilidad y estabilidad son requerimientos importantes para el receptor.

Los receptores para radiotelescopios son iguales en su construcción a receptores empleados en diferentes ramas de la radio ciencia e ingeniería.

La siguiente etapa es un mezclador en donde la señal aún débil es mezclada con una fuerte señal de un oscilador local a una frecuencia V_o obteniendo una señal de salida a una frecuencia intermedia (FI), esta señal obtenida es directamente proporcional a la señal de potencia de RF. Por lo tanto, a la señal FI se le amplifica con una ganancia en el orden de los 60 a 90 dB, la mayor parte de la ganancia en un receptor heterodino se adquiere en este amplificador de FI, que al mismo tiempo determina el ancho de banda del pre-detector al receptor. Este es seguido de un detector (dispositivo de la ley cuadrática: la salida de voltaje en baja frecuencia es proporcional al cuadrado de la amplitud de entrada) lo cual significa que la salida de voltaje en baja frecuencia es directamente proporcional a la potencia de ruido de la salida de la sección de predetección del receptor. Las últimas etapas consisten en un amplificador pasa bajos o integrador y un sistema de almacenamiento de datos como un sistema de salida digital.

El integrador, integra la señal de potencia observada por un tiempo determinado, el valor usado es por lo general del orden de los segundos y seleccionado entre valores de tiempo de integración muy cortos lo que produce ruido excesivo a la salida del receptor o tiempos de integración muy largos que causa suavizado excesivo y pérdida de la información.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

6.7.2 RTLSDR

A principios de 2012, se descubrió que ciertos DVB-T "dongles" (dispositivos USB los cuales permiten ver DVB-T de televisión abierta sobre una antena de aire) tenían un modo especial que les permitían ser utilizados como receptores SDR para señales en banda base. En este modo, las muestras de banda base digitales evitan el DVB-T demodulador / decodificador en el chip RTL2832U, y se envían a través de USB. Normalmente, estos dispositivos envían y decodifican parcialmente tramas de transporte MPEG más de la USB, pero en este modo de "SDR", envían las muestras de banda base I / Q primas en su lugar.

Estos "dongles" permiten sintonizar la frecuencia de la línea del hidrógeno en 1420 MHz. Estos dispositivos, que son dispositivos de consumo para el mercado masivo, están disponibles a precios muy bajos, por lo general alrededor de 20 dólares de los vendedores en línea en eBay, AliExpress, Nooelec, etc.

Una biblioteca de controladores se produjo rápidamente en base a la información obtenida de hojas de datos y un poco de ingeniería inversa. La biblioteca de controladores se puede utilizar independiente o con un "plug in" para Gnu Radio que permite a las aplicaciones GNU Radio utilicen los dispositivos RTLSDR.

6.7.3 RTL-SDR Blog marca R820T2 RTL2832U Dongle

- Puede sintonizar a partir de 24 MHz a 1,7 GHz y tiene hasta 3,2 MHz de ancho de banda instantáneo.
- Excelente para aplicaciones, incluyendo la exploración de radio general, el control del tráfico aéreo, la radio de seguridad pública, ADSB, AIS, ACARS, radio troncalizado, P25 de voz digital, POCSAG, globos meteorológicos, APRS, los satélites meteorológicos NOAA APT, la radioastronomía, la supervisión de dispersión de meteoros.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Rango dinámico superior, utilizando ADC de 12 bits, dando más o menos 70 dB de SFDR
- Mejor precisión de frecuencia: +/- 2,5 ppm
- Ruido de fase mucho más bajo
- Excelente equilibrio fase / amplitud

6.7.4 Hardware: Un ordenador PC

Se necesitará un computador para procesar los datos provenientes del receptor.

Mientras que no se necesite una supercomputadora para procesar los datos se debe evitar enviar algo fuera de la papelera de reciclaje para los experimentos de radioastronomía basado en DEG.

Se recomienda un sistema de doble núcleo, funcionando a 2,8 GHz o superior, con al menos 2 GB de RAM para apoyar el software GNU Radio que se requiere utilizar.

En el presente trabajo se ejecutó el software de la observación en un sistema de AMD Phenom II X4, que cuenta con 3 GB de RAM, y funciona a 3.2GHz. Consume aproximadamente 1/3 de ese sistema en términos de recursos de la CPU, en 1.5Msps frecuencia de muestreo.

Por tanto el hardware y el RTL-SDR Blog marca R820T2 RTL2832U Dongle, necesitará un puerto USB 2.0 libre disponible en el sistema.

6.8 Sistema Operativo utilizado: Ubuntu 14.04

Ubuntu es un sistema operativo basado en GNU/Linux y que se distribuye como software libre, el cual incluye su propio entorno de escritorio denominado Unity. Su nombre proviene de la ética homónima, en la que se habla de la existencia de uno mismo como cooperación de los demás.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

6.8.1 ¿Qué significa que sea libre?

Software libre significa que los usuarios tienen la libertad de ejecutar, copiar, distribuir, estudiar, modificar y mejorar el software.

El software libre es una cuestión de libertad, no de precio. Para entender el concepto, debe pensarse en “libre” como en “libertad de expresión”

Más precisamente, software libre significa que los usuarios de un programa tienen las cuatro libertades esenciales:

- La libertad de ejecutar el programa como lo desee, con cualquier propósito (libertad 0).
- La libertad de estudiar el funcionamiento del programa y adaptarlo a sus necesidades (libertad 1). El acceso al código fuente es un prerrequisito para esto.
- La libertad de redistribuir copias para ayudar a los demás (libertad 2).
- La libertad de mejorar el programa y de publicar las mejoras, de modo que toda la comunidad se beneficie (libertad 3). El acceso al código fuente es un prerrequisito para esto.

6.9 Software: Gnu Radio: La Infraestructura del Procesamiento de Señales

GNU Radio es un software de desarrollo de herramientas de código libre y abierto que proporciona bloques de procesamiento de señales para implementar software radio. Este puede ser usado con hardware de RF externo de bajo costo para crear radios definidos por software o sin hardware utilizando el entorno de simulación. Es ampliamente utilizado en entornos de aficionados, académicos y comercial para contribuir tanto en la investigación de comunicaciones inalámbricas y sistemas de radio del mundo real. GNU Radio está licenciado bajo la GNU General Public License (GPL) versión 3. Todo el código es propiedad de la Fundación del Software Libre.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Las aplicaciones de GNU Radio son escritas a principio utilizando el lenguaje de programación Python, mientras que el suministro de herramientas críticas de procesamiento de señales que requieren alto rendimiento son implementados en C++ usando extensiones de procesamiento de punto flotante, cuando este está disponible. Así, el desarrollador es capaz de implementar, de manera simple, sistemas de radio de alto rendimiento funcionando a tiempo real aprovechando el ambiente de desarrollo de aplicaciones de manera inmediata.

Aunque no es una herramienta principalmente de simulación, GNU Radio complementa el desarrollo de algoritmos de procesamiento de señales a partir de datos previamente grabados o generados, evitando la necesidad de hardware de RF. (Reyes, 2014).

6.9.1 Aplicación simple_ra

Esta es una aplicación desarrollada como una colección de herramientas de código abierto por el señor Marcus Leech de Science Radio Laboratories Inc, para las observaciones de radioastronomía, la cual ha sido implementada en nuestro sistema operativo y a través del cual procesaremos los datos obtenidos del receptor digital de HI dl radio observatorio del IAR en Argentina.

La colección de herramientas conocida como simple_ra incluye.

- Modo de operación para registro y análisis de emisiones de radio en el continuo.
- Modos de interferómetros de correlación.
- Monitoreo Pulsar
- Observaciones espectrales

La aplicación simple_ra se basa en el marco de aplicación Gnu Radio SDR, y proporciona una interfaz gráfica de usuario WXGUI, así como amplias opciones de configuración a través de líneas de comandos y un conjunto de herramientas de post-procesamiento.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

6.9.2 Requisitos Del Sistema

El software puede ser obligado a correr en sistemas de un solo núcleo y multi-core con al menos 2 GB de memoria y un moderno CPU de clase x86 funcionando a 2,1 GHz o más rápido.

El software se puede instalar en sistemas operativos tanto en Fedora y Ubuntu, así como Scientific Linux 6.3.

Se requiere hardware SDR que sea compatible con el "plug in" gr-osmosdr para GNU Radio, tal hardware incluye.

- RTLSDR dispositivos "dongle"
- Dispositivos Ettus Investigación USRP
- Dispositivos HackRF y BladeRF
- Dispositivos AirSpy

Para los fines de la sincronización de tiempo, se recomienda que el sistema sea configurado para utilizar NTP en la sincronización de la hora del sistema. Otros servicios también se pueden usar, lo fundamental es que la hora del sistema debe ser precisa en todo momento. Durante la instalación, el sistema debe estar conectado a Internet, para permitir que los paquetes de software se descarguen e instalen.

El proceso de registro de datos produce varios megabytes por día de archivos de registro, dependiendo de la configuración.

Las actividades ejecutadas para adecuar nuestro sistema de procesamiento de señales fueron las siguientes:

6.9.3 Instalación

Hay un script de instalación en:

<http://www.sbrac.org/files/install-gr-ratools> (Ver anexo F)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Este script instalará los requisitos previos Gnu Radio, así como simple_ra y herramientas relacionadas.

Debe ejecutarse en las últimas distribuciones Fedora, Ubuntu, RedHat y SL6.

Una vez que se ha descargado, se puede ejecutar como un script de shell:

```
chmod 755 install-gr-ratools
```

```
./install-gr-ratools
```

6.9.4 El comando simple_ra

El comando que se utiliza para iniciar la aplicación simple_ra se llama simple_ra. En nuestro sistema hemos depositado el directorio HOME / bin \$ en la ruta de búsqueda de comandos, puede iniciar la aplicación simplemente escribiendo simple_ra en el símbolo del sistema.

El comando simple_ra toma una gran cantidad de parámetros de línea de comandos, como se muestra a continuación.

--srate rate

Este comando establece la frecuencia de muestreo que se utilizará por el hardware para el dispositivo, adjunta la solicitud de muestreo a la aplicación en Hz.

--devid device

Esto establece el ID de dispositivo del canal principal de dispositivo.

--devid2 device

Esto establece el ID de dispositivo del canal secundario al dispositivo.

Si se especifica un dispositivo de hardware real, entonces la aplicación permite automáticamente ya sea en modo diferencial (donde el canal -devid2 es una referencia de terminado), o el modo de interferómetro, dependiendo de la configuración de -interf.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

--longitude *decimal-longitude*

Esto establece la longitud usada por los cálculos LMST a decimal y longitud. Longitudes que son conceptualmente "oeste" se expresan como números negativos.

--fftsize *size*

Ajusta el tamaño de la FFT se utiliza en el registro espectral a medida. El tamaño de la visualización espectral instantánea, sin embargo, es siempre 2048. Este ajuste se debe por razones de eficiencia, utilizar un tamaño que es una potencia de 2, y 1024 probablemente el tamaño más pequeño es más útil.

--freq *frequency*

Esto prepara los controles, el ajuste y la frecuencia, en Hz. Se permite notación exponencial. Así que, por ejemplo, de 1 GHz se puede introducir como 1.0e9.

--gain *gain*

Ajusta la ganancia del hardware de RF. -srate y -frequency, se aplica si se utilizan dos dispositivos.

--dbw *detector-bandwidth*

Esto establece el ancho de banda detector, en Hz, detector de ancho de banda. Este ajuste debe ser menor que la frecuencia de muestreo, y es a menudo establecido a aproximadamente 80% de la frecuencia de muestreo nominal. También se puede utilizar para conformación espectral a un cierto grado en situaciones de RFI.

--dcg *dc-gain*

Esto establece la ganancia DC a DC-ganancia. El valor proporcionado debe ser uno de [100, 1000, 10000, 100000].

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

--irate *logging-rate*

Esto establece el intervalo de registro en segundos, de los datos registrados. Un valor de 5 es típico.

--ppm *ppm-estimate*

Para algunos tipos de hardware, esto puede ser usado para decir a los drivers que la frecuencia estimada partes por millón está compensada. El valor ppm-estimación dada es un número de coma flotante.

--fifo *fifoname*

Esto establece el nombre de archivo utilizado para enviar datos del detector de alta velocidad para una FIFO externo para otros tipos de procesamiento en tiempo real. Normalmente, esto se establece en / dev / null, pero se puede ajustar a cualquier archivo legítimo usando fifoname. Por lo general, una secuencia de comandos externa establecería un FIFO, y el lector FIFO, y luego decirle simple_ra lo que el nombre de este FIFO es.

--skoffs *sky-offset*

Esta opción se utiliza cuando la frecuencia sintonizada y frecuencia cielo son diferentes. Por ejemplo, para una alimentación de banda C comercial estándar, el rango de frecuencia sintonizada sería 950-1450 MHz, típicamente, pero la frecuencia cielo es 2750Mhz superior. Si este es el caso, se utiliza sky-offset para configurar el uso de un convertidor hacia abajo antes de que el hardware del receptor. Esto afecta a la frecuencia que se registra en los archivos de registro, así como cálculos de dispersión de para monitoreo pulsar.

--expname *experiment-name*

El software produce dos formatos de archivos de registro, uno de los cuales es en un formato CSV para su uso con programas como Excel. El parámetro experiment-name se

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

utiliza para añadir un sufijo a los archivos .CSV dando el (abreviado) nombre del experimento.

--cdevn *calib-device-name*

Esto establece el nombre del dispositivo de *calib-device-name* (normalmente un dispositivo serie USB como / dev / ttyUSB0 o / dev / ttyACM0) se utiliza para controlar la calibración de las señales on/off, si se utilizan.

--cdevrate *calib-device-baud*

Esto establece la velocidad de transmisión de hardware del dispositivo de control de calibrador a *calib-device-baud*. Para un dispositivo serie basada en USB, este ajuste no suele ser significativo, pero se debe especificar de todos modos.

--cdevon *calib-device-onstring*

Esto establece la cadena de caracteres para enviar al dispositivo de control de calibrador a *calib-device-onstring* para conectar la fuente de calibrador.

--cdevoff *calib-device-offstring*

Esto establece la cadena de caracteres para enviar al dispositivo de control de calibrador a *calib-device-offstring* para desconectar la fuente de calibrador.

--cdevinit *calib-device-initstring*

Esto establece la cadena de inicialización para el dispositivo de control de calibrador a *calib-device-initstring*. Esto se utiliza normalmente en tiempo de inicio para inicializar el dispositivo de control de calibración a un estado conocido.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

--cinterval *auto-calib-interval*

Esto establece el intervalo para la corrida de calibración automática de *auto-calib-interval*, en segundos.

--contime *auto-calib-ontime*

Esto establece el tiempo de ON para la calibración automática de *auto-calib-ontime* en segundos.

--sppe

Esto permite el procesamiento espectral avanzado, incluyendo filtros de muesca, espectral aplanamiento y dispersión DE.

--spde

Esto permite visualización espectral significativa. Sin esto, todavía hay una visualización espectral, pero se ejecuta a una velocidad muy baja, para conservar los ciclos de CPU.

--sple

Esto habilita el registro espectral.

--dfd

Este indicador se utiliza para desactivar el detector de pre-filtro (fijado con *-dbw* arriba). Al establecer esta opción reduce la huella de una pequeña cantidad de CPU.

NAMING DEVICE

El parámetro *--devid* acepta un nombre de dispositivo en el formato utilizado por el *gr-osmodr* bloque de origen "genérico", que es compatible con varios tipos de dispositivos, incluyendo.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Dispositivos Ettus Investigación UHD / USRP
- dongles RTLSDR
- HackRF
- BladeRF

RTLSDR

Para nuestro dispositivo RTLSDR, se utilizó.

--**devic rti**= opciones nombre-o índice.

Algunas opciones incluyen.

offset_tune = 1

Esta afinación permite compensar para sintonizadores E4000, que utilizan la conversión directa. Esto mueve efectivamente la "anomalía DC" fuera de la banda de paso entregado al anfitrión.

buflen = tamaño de buffers

Esto le permite especificar el tamaño de los buffers de transacción. Normalmente, los valores predeterminados están bien, pero si se está funcionando a baja frecuencia de muestreo (300k y abajo), use buflen = 32.768.

buffers = número-de-buffers

Cuando se tiene varios dispositivos en el mismo host, puede ser necesario especificar el número de buffers para asignar a un solo dispositivo.

El uso de la aplicación simple_ra

Cuando se invoca simple_ra se origina una ventana (ver imagen 50) con la que se calibrará y realizarán distintos barridos para la recepción de los datos que se desean capturar; así

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

como la ventana espectral que nos presentará los distintos cambios que sufrirá la señal capturada.

Controles

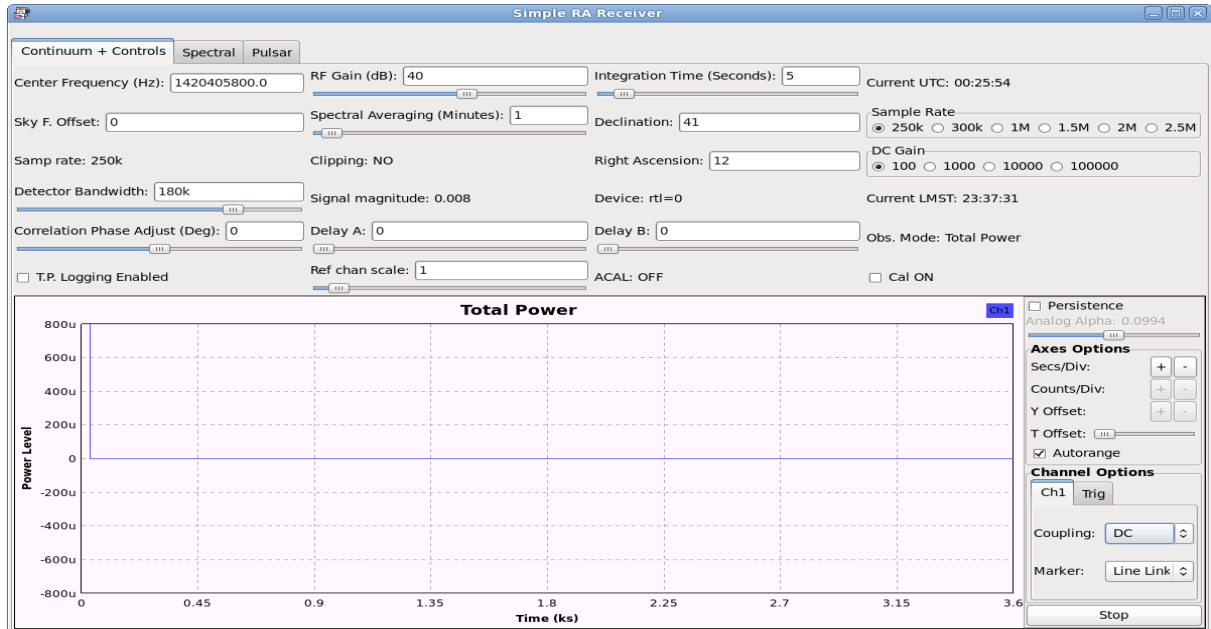


Imagen 50. Ventana de controles para calibración y barrido del software Simple RA.

Separaremos la imagen 50 en secciones para enfocar un poco más las funciones que realiza este control.

Se muestran los controles GUI para la pestaña principal (Continuum) en dos secciones.

Sección 1

En la Imagen 51. Muestra los controles sección izquierda superior ventana simple RA. En esta sección se controla la recepción de los datos frecuencia central, control de la escala de referencia, ancho de banda del pre-detector, azimut remoto de la antena, ajuste de fase de correlación, tiempo de observación y valor canal de referencia.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

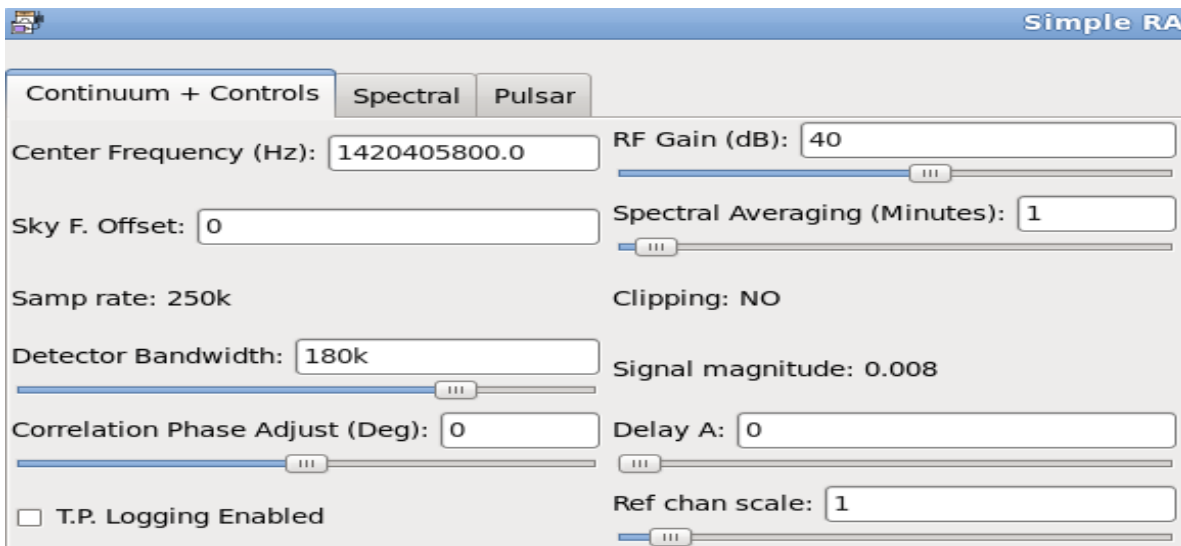


Imagen 51. Controles sección izquierda superior ventana simple RA.

Center Frequency

Este control le permite introducir la frecuencia del sintonizador, en Hz. Al igual que la opción -freq en la línea de comandos, acepta notación exponencial (para nuestras observaciones 1420.4058e6).

Sky F. Offset

Esto establece la frecuencia de desplazamiento del cielo para situaciones en las que se está utilizando hacia abajo (o hacia arriba) del convertidor delante del hardware del receptor.

Samp Rate

Esto indica la frecuencia de muestreo que se utiliza actualmente.

Detector Bandwidth

Al igual que la opción de línea de comandos -dbw, este control deslizante ajusta el ancho de banda pre-detector de corriente.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Correlation Phase Adjust (Deg)

Esto establece el ajuste de fase de correlación, en grados, que abarca desde -180 hasta 180 grados.

T.P. Logging Enabled

Esto se utiliza para habilitar el registro de los datos totales potencia / diferencial detector / interferómetro.

RF Gain

Esto establece la ganancia RF aproximada del hardware sintonizador.

Spectral Averaging (Minutes)

Esto establece el tiempo de promedio, en minutos, para los datos espectrales registrados.

Clipping

Este campo indica si la magnitud de entrada está cerca de recorte, y se puede utilizar como un indicador de ganancia de RF respaldo-off.

Signal Magnitude

Este campo indica la magnitud de las señales que llegan desde el hardware, siendo 1.0 la magnitud máxima a esperar del hardware.

Delay A

Ajusta el retardo (en muestras) en la "A" rama del interferómetro, si está habilitado.

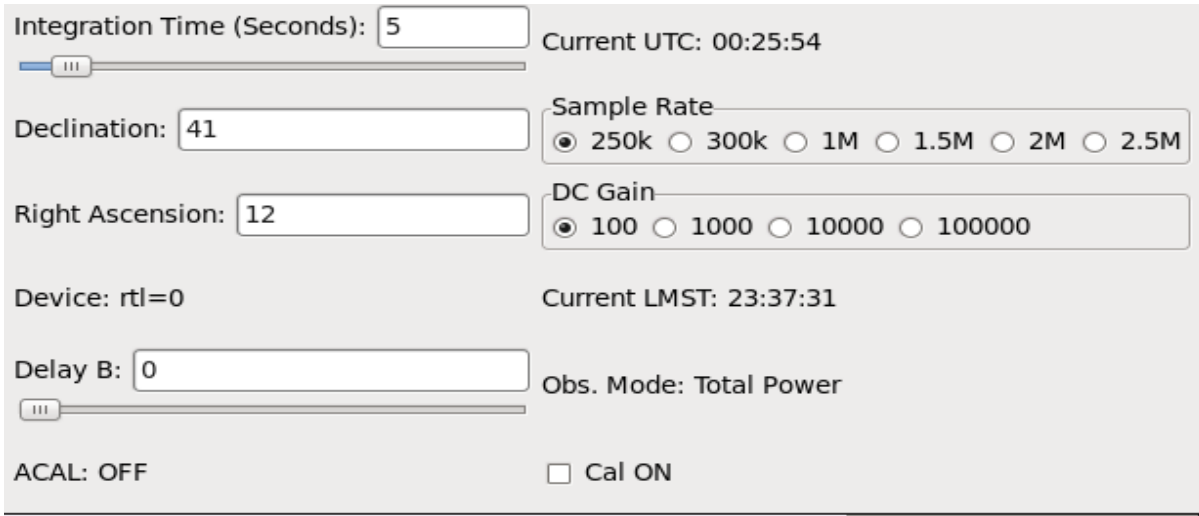
	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Ref chan Scale

Cuando se opera en el modo radiómetro diferencial, este control deslizante establece el valor de escala para el canal de referencia, que le permite ajustar de modo que "el cielo frío" es sólo ligeramente por encima de la línea de cero.

Sección 2

En la Imagen 52. Se muestran los controles de sección a derecha superior ventana simple RA. En esta sección se controla la elevación remota de la antena, tiempo de barrido, base de tiempo de la señal, frecuencia a la que se desea muestrear, integración de la hora local sideral para la integración de los datos



Integration Time (Seconds): Current UTC: 00:25:54

Declination: Sample Rate

Right Ascension:
 250k 300k 1M 1.5M 2M 2.5M

Device: rtl=0 Current LMST: 23:37:31

Delay B: Obs. Mode: Total Power

ACAL: OFF Cal ON

Imagen 52. Controles sección derecha superior ventana simple RA.

Integration time (Seconds)

Esto establece el tiempo de integración (en segundos) en la cadena de procesamiento post-detector.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Declination

Este campo se utiliza para proporcionar información de anotación en los archivos de registro y se debe utilizar cuando se cambia la declinación.

Right Ascension

Este campo se utiliza para indicar la ascensión correcta (AR) de observaciones. En el modo de meridiano tránsito, no es significativo, se utiliza con un instrumento de seguimiento que puede ser utilizado y ajustado automáticamente desde un programa externo.

Device

Este campo indica el deviceID de la primera (principal) dispositivo de hardware.

Delay B

Este campo se utiliza para establecer el retraso (en muestras) en la rama de "B" en el modo de interferómetro.

ACAL

Este campo indica el estado actual de los controles externos CAL. Se mostrará ON cuando sea el CAL se ha activado manualmente, o hay un evento automática CAL en curso.

Current UTC

Este campo indica la hora UTC actual.

Sample Rate

Este campo se utiliza para seleccionar la frecuencia de muestreo deseada. Para muchos tipos de hardware, el cambio de la frecuencia de muestreo después del arranque no es recomendable, pero este campo se incluye para la integridad de hardware que es más flexible.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

DC Gain

Este campo se utiliza para ajustar el post-detector "ganancia". Esto es conceptualmente similar a la ganancia "DC" en radiómetros analógicos convencionales.

Current LMST

Este campo muestra la corriente Local Mean Time Sideral, calculado a partir de la hora UTC y la conImagenci3n -longitude utilizado en la l3nea de comandos. El LMST se registra en el detector y los datos espectrales.

Obs. mode

Este campo indica que el modo de detector est3 actualmente en uso: Energ3a total, diferencial, o Correlaci3n interfer3metro.

Cal ON

Esta casilla de verificaci3n se utiliza para activar manualmente la fuente CAL externo.

6.8 La ventana del detector

La sub-ventana del detector implementa una ventana de trazado que es similar en muchos aspectos a una banda de papel, tal como se utiliza en muchos telescopios de radio anal3gica para aficionados. (Ver Imagen 53) En el lado derecho hay un panel de control t3pico para una pantalla de "scope" Gnu Radio. En general, s3lo los siguientes controles deben ajustarse

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

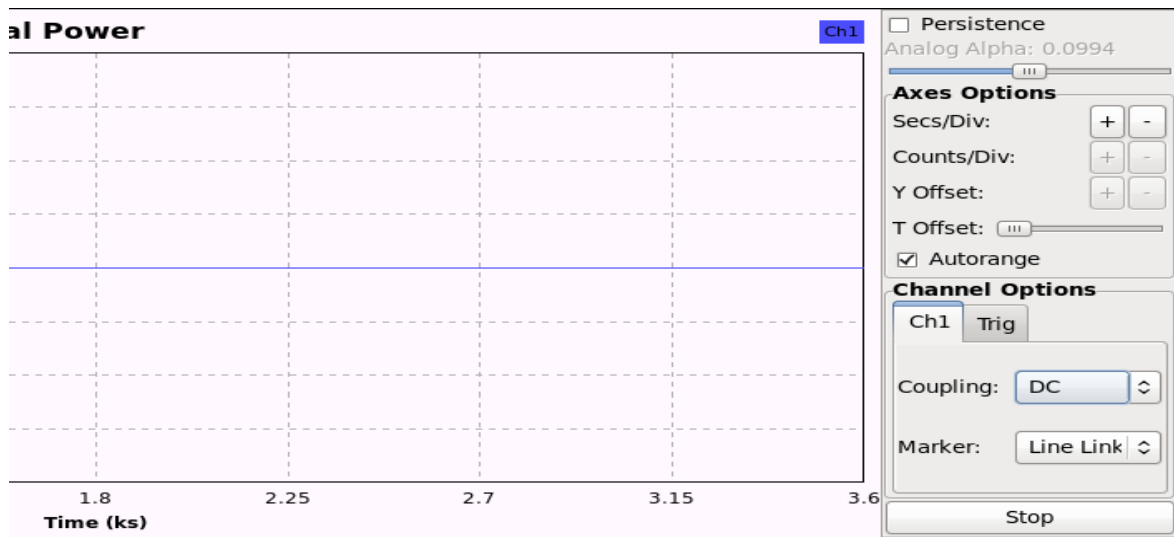


Imagen 53. Ventana del detector simple RA con la cual ajustamos la posición de la señal, ampliación de la señal, el canal a utilizar, sincronismo y acoplamiento de la señal.

6.8.1 Autorange

Por lo general es conveniente activar este control OFF, y utilice manualmente Counts/Div e Y Offset para llevar las señales dibujadas en el rango. Evite ajustar el control Secs / Div si es posible, ya que Gnu Radio no restaura de nuevo a la configuración original de tiempo de incremento.

El único otro control útil es el control de parada, que puede ser utilizado para suspender temporalmente las actualizaciones de la pantalla banda de papel. Esto no suspende el registro de datos, sólo se muestran los datos.

Counts / Div

Esto se utiliza para controlar las unidades / división en la pantalla.

Y Offset

Este control se utiliza para ajustar el valor mínimo mostrado en Y.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

6.9 La ventana espectral

La ventana espectral se selecciona haciendo clic en la pestaña "spectral" en la parte superior de la ventana. Esta ventana se utiliza para proporcionar el control de algunos aspectos del procesamiento espectral y también para mostrar la corriente (promedio) del espectro. Parte de la ventana se muestra a continuación (ver imagen 54)

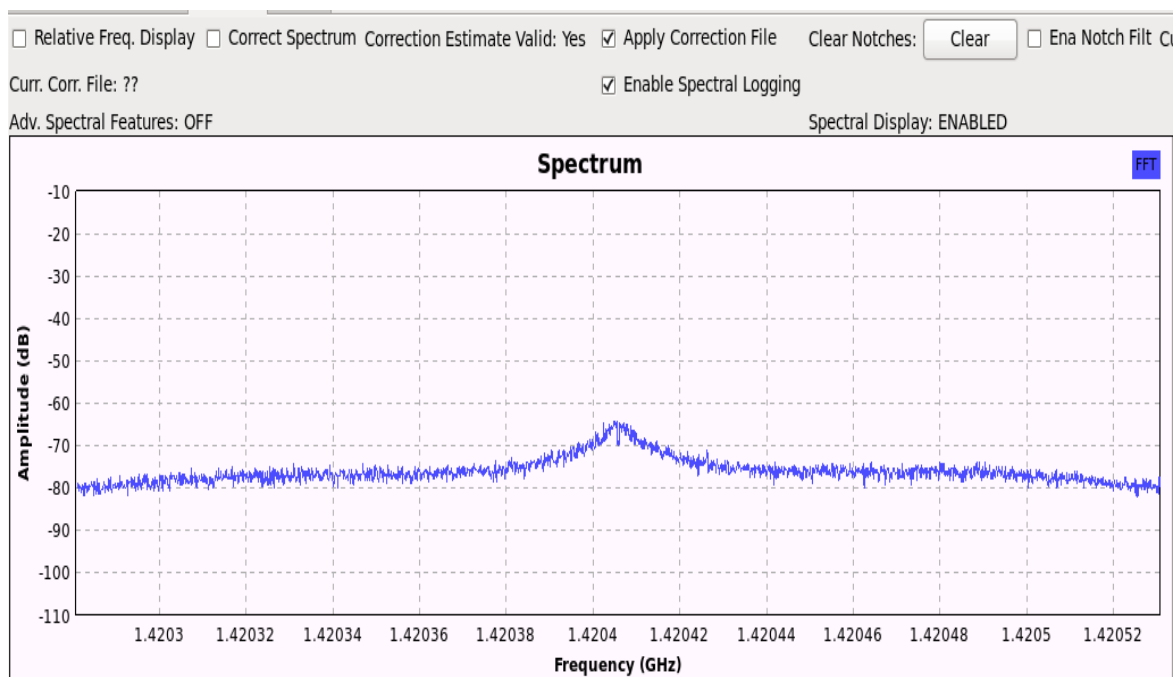


Imagen 54. Ventana espectral simple RA. Además de mostrar formas de onda, la pantalla se llena con detalles sobre los valores de control de la forma de onda.

Relative Freq. Display

Este control se utiliza para seleccionar entre visualización de la frecuencia relativa y visualización de la frecuencia absoluta. Por lo general, se utiliza sólo visualización de la frecuencia absoluta.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Curr. Corr. File

Esto muestra el nombre de archivo del archivo que se puede utilizar para corregir el espectro para precisión de la observación (en nuestro caso, cuando la observación de HI).

Adv. Spectral Features

Este campo indica si las características espectrales avanzadas están habilitadas, incluyendo el grado de filtrado, aplanamiento espectral y de dispersión.

Correct Spectrum

Este control activa / desactiva la corrección de espectro, ya sea desde una estimación espectral dinámica, o a partir de un archivo de corrección externa. Se debe en cuenta que la corrección se realiza sólo si -sppe también se fija en la línea de comandos.

Correction Estimate Valid

Este campo se utiliza para indicar la validez de la estimación espectral internamente computado. Cuando este campo indica "SI", es "segura" para aplicar el control " Correct Spectrum".

Apply Correction File

Este control se utiliza para permitir el uso del archivo de corrección externo y poder corregir el espectro, en lugar de la estimación espectral internamente computada.

Enable Spectral Logging

Este control se utiliza para habilitar / deshabilitar el registro de los datos espectrales a los archivos de registro. Refleja la opción de línea de comandos -sple en el arranque.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Clear Notches

Este control pulsador se utiliza para limpiar la tabla notch-filter, si el notch-filtering se encuentra en uso.

Spectral Display

Este campo indicador muestra si la visualización espectral está en un estado activado, y por lo tanto la visualización espectral muestra datos válidos.

Ena. Notch Filt

Este control determina si el filtrado está habilitada en la "suite" de opciones de procesamiento espectrales avanzados. Tenga en cuenta que -sppe también se requiere para que este campo sea efectivo.

6.10 Panel de control de la pantalla espectral

Al igual que el gráfico 56 el de detector, la visualización espectral tiene un panel de control en el lado derecho, creado como un componente normal de un Gnu Radio "FFT Sink". *Aquí se pueden* adquirir varias formas de onda, las promedia y presenta la forma de onda resultante.

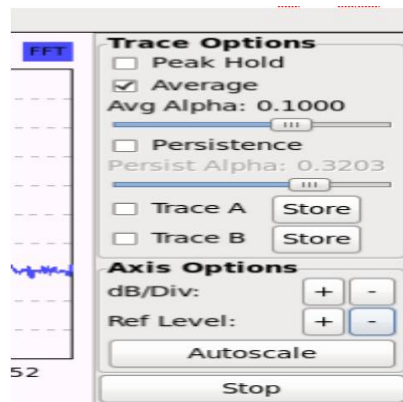


Imagen 55. Panel de control de la pantalla espectral simple RA.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Average

Este control se utiliza para activar un promedio ON / OFF.

Avg. alfa

El control deslizante ajusta el valor alfa utilizado en el filtro IIR que proporciona promedios. Cuanto menor sea este valor, más de promedio que tiene lugar en la pantalla. Este control no está relacionado con el control de promedio espectral en la ventana principal.

dB / Div

Este control se utiliza para ajustar la granularidad del eje Y

Ref Level

Este control se utiliza para ajustar el valor mínimo Y, en dB.

Stop / Start

Este control se puede utilizar para Detener / Iniciar la visualización espectral temporalmente. Otro procesamiento espectral sigue teniendo lugar cuando se detiene la pantalla.

6.11 Implementación por gráficos de flujo utilizando GNU Radio companion

El esquema mostrado en la imagen 56 fue diseñado por el señor Marcus Leech de Science Radio Laboratories, Inc. Esta herramienta permite la creación de gráficos de flujo de la señal y la generación de código fuente de flujo gráfico.

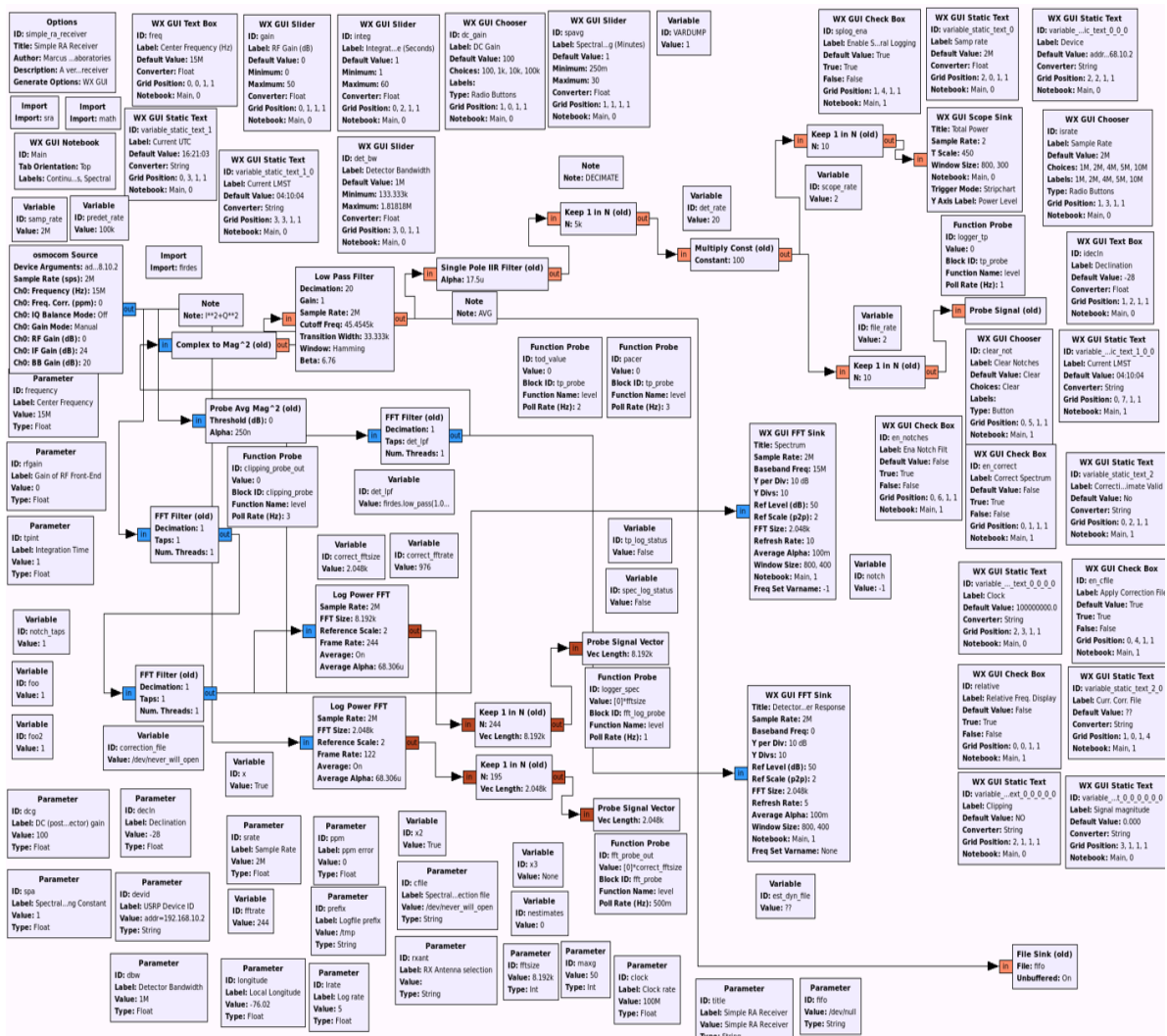


Imagen 56. Gráfico de flujo GRC Simple_Ra

6.12 Observación a partir de los Datos del receptor digital HI(IAR)

Tenemos nubes de moléculas o material de Hidrógeno Neutro (HI) distribuido por el universo y en particular en la galaxia, este HI en ciertas condiciones emite radiación y esta radiación tiene una firma espectral es decir ocupa una parte específica del espectro y tiene cierta forma.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Sabiendo cual es la firma espectral o frecuencia de reposo del HI podemos comparar el perfil que podemos ver con el radiotelescopio; vamos a recibir un perfil que va a ser diferente del perfil teórico, lo que se ve va a tener cierta forma y esa forma es lo que me va a dar información del objeto que estoy observando.

Entonces tenemos un fenómeno que se quiere observar y se sabe que su frecuencia central estará en 1420.405MHz

Lo que nos interesa ver está distribuido en frecuencias alrededor de la frecuencia central el cual tendrá cierto ancho de banda.

Voy a seleccionar "X" ancho de banda y "Y" resolución espectral, en otras palabras, la cantidad de canales a usar.

Por ejemplo, si tomamos como frecuencia central 1420.405 MHz con un ancho de banda de 2 MHz (por experiencia del IAR inicialmente es suficiente lo máximo utilizable serían 10 MHz) y 1024 canales.

A partir de esto sacamos el requerimiento de nuestro instrumento, la entrada para diseñar el receptor tendría predeterminado los siguientes parámetros: FC 1420.405 MHz con 2Mhz de BW

Tenemos un objeto en el medio que va a depender de como sea nuestro detector, por ejemplo, el receptor antiguo del IAR para ver espectros se llamaba autocorrelador (por la función de autocorrelación) y era un equipo que recibía señales de 0 a 5Mhz en video o banda base.

Entonces el diseño del receptor tenía que llevar los 1420 MHz a banda base, con filtros mezcladores, amplificadores y demás circuitos que requería el sistema.

Ahora se usan los receptores de televisión digital dongle USB que tienen un rango de frecuencia más amplio, de 30Mhz a 1700Mhz, se podría recibir directo en 1420 MHz, pero por comodidad se usa la FI de 150Mhz.

Luego podemos decir que nuestro "detector" va a operar en 150Mhz con un BW de 2Mhz. El desarrollo de ingeniería en este caso va a ser como llevar esa señal de RF a un detector tenemos ya el requerimiento, el detector y la cadena receptora.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Entonces ahora tenemos que pasar la señal detectada a algo me que muestre lo que quiero. De acuerdo a lo anterior, el detector por ahora es solo un ADC rápido, que me permite digitalizar señales de RF de mi FI y tenerlas directo en la PC permitiendo hacer el proceso necesario por software, gracias a los ADC rápidos podemos reducir la cantidad de hardware necesario y al tener la señal de RF directamente en la PC podemos mediante software definir los bloques necesarios, filtrado, mezcladores, análisis espectral, etc.

Ahora lo que voy a hacer es tomar muestras durante cierto periodo de tiempo. En este punto casi como si fuese un osciloscopio rápido tomo muestras a alta velocidad durante cierto tiempo; sin entrar en el detalle del SDR podemos decir que para cierta R de entrada (FI en 150MHz) voy a tener una velocidad de muestreo que va ser igual al BW que voy a observar esto es propio del SDR usado por brindar muestras del tipo en cuadratura I/Q.

Podemos decir que, si quiero ver un BW de 2 MHz, mi muestreo ADC tiene que ser de 2 MHz a la frecuencia usada es decir 150MHz, entonces vamos a "medir u observar" durante "X" tiempo lo que me va a dar $2e^6$ muestras discretas de señal. En este punto es importante notar una cosa, cuando manejamos datos discretos un segundo son 4 Mbytes de I y Q (cada muestras es un byte), 10 seg son 40Mb, 100seg son 400MB y una hora pasa los 4GB. Una vez que tengo esos datos discretos los puedo procesar como quiera, como a nosotros nos interesa el punto de vista espectral voy a pasar esos paquetes en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia allí entra la FFT.

Se podría hacer una FFT de todos los datos lo cual tardaría demasiado tiempo, lo que hacemos aquí es hacer pequeñas medidas de algunos segundos hacer la FFT y promediar con los nuevos datos. Por ejemplo mido 10 seg, calculo la FFT, mido otros 10 segundos, calculo la FFT y promedio con la FFT anterior con esto voy descartando los datos crudos y solo me queda la última FFT de grupos de 4Mb solo me quedan arreglos de 1K.

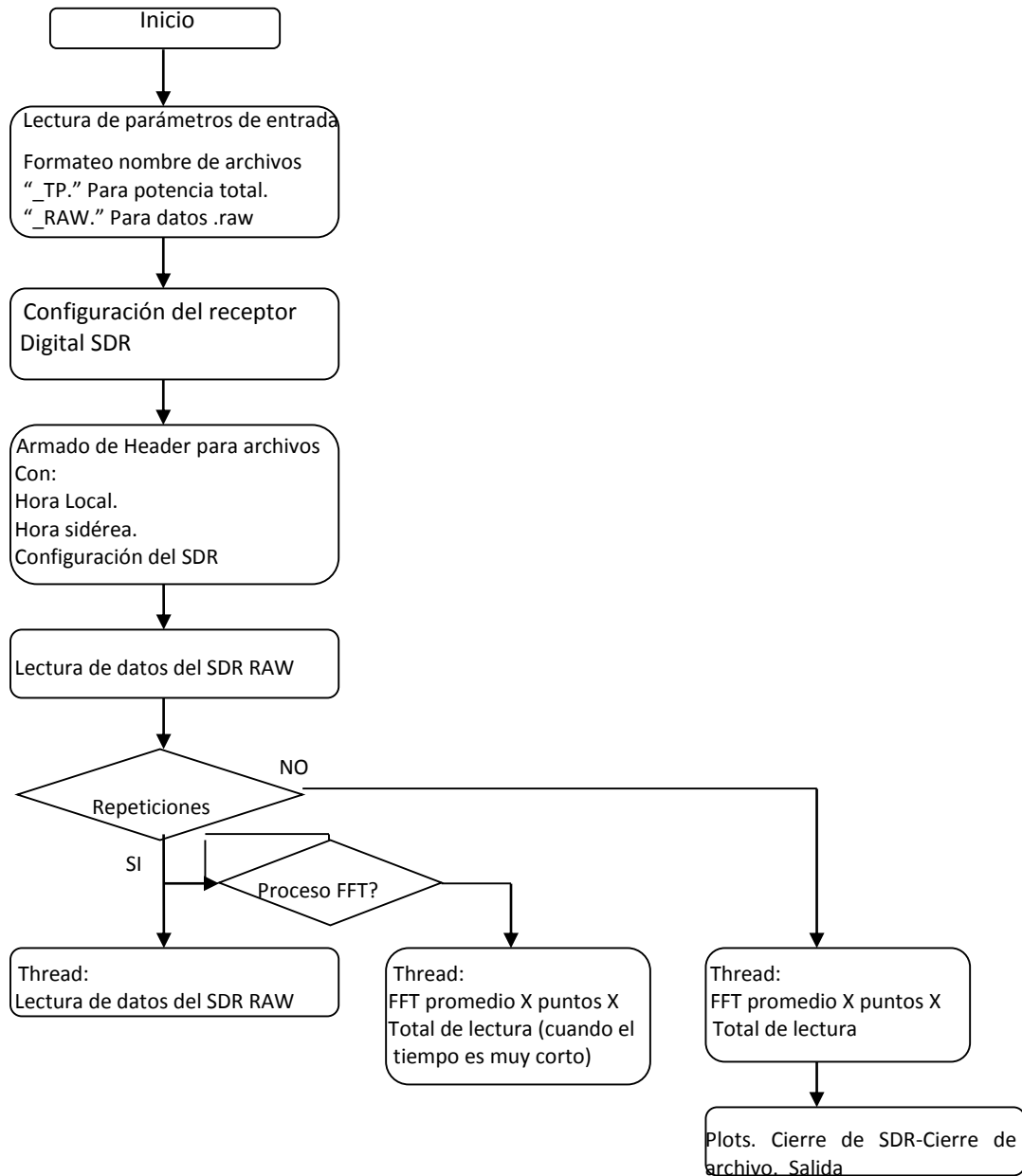


Imagen 57. Diagrama de flujo para la realización de una observación, toma de muestras y procesamiento.

Al momento de observar se hace un ajuste por el movimiento local de la tierra alrededor del sol, es decir se resta el efecto del movimiento de la tierra-sol al corrimiento de la galaxia por lo tanto cuando medimos espectros pasamos de frecuencia a velocidad $[Kms/s]$.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En la imagen 56 se realiza un diagrama de bloques el cual se relaciona todo este proceso de una forma generalizada.

Observación Cignus

Para la realización de esta observación se necesitó.

- Software Simple_Ra el cual utiliza librerías-GNU de rtl-sdr.
- Base de datos enviada por el Instituto Argentino de Radioastronomía, archivo .RAW.
- Bases de datos LAB Leiden Argentine Bonn Survey realizada en el IAR.

El estudio consta de un total de 50 980 datos de hidrógeno neutro ($\lambda = 21$ cm) con posiciones en $\delta \leq -25^\circ$ recopilados del cielo sur, contenidos en una cuadrícula de coordenadas galácticas (ΔL , Δb) espaciados 0.5° en latitud (b) galáctica y aproximadamente $\frac{0.5^\circ}{\cos(b)}$ en longitud galáctica (L); observados con la antena de 30 mts de diámetro del Instituto Argentino de Radioastronomía (IAR).

La resolución angular de la observación es HPBW (Half Power Beamwidth) = 0.5° , la cobertura de velocidad se extiende en el intervalo de -400 Km. s^{-1} a $+400 \text{ Km. s}^{-1}$ (LSR, Local Standard of Rest). La resolución de velocidad es $1,27 \text{ Km. s}^{-1}$ y el ruido rms final de toda la base de datos es de $0,07 \text{ K}^\circ$.

Se comienza una observación en el plano de nuestra galaxia, la Vía Láctea, a través de sus brazos espirales hacia Cygnus en la imagen 58. En dicha imagen se muestra la cantidad de datos en la escala vertical y la velocidad radial en la escala horizontal. Se observan dos picos lo que indica altas concentraciones de hidrógeno neutro a determinada velocidad.

El pico más grande es la radiación del hidrógeno en el brazo de Cygnus el pico más pequeño pertenece a la radiación de hidrógeno en el brazo Orion local.

Los pequeños rizos obedecen al ruido provocado por la temperatura atmosférica y la temperatura de nuestro sistema receptor.

La línea azul obedece a la línea base con la que se comenzarán a realizar los cálculos para la obtención del perfil.

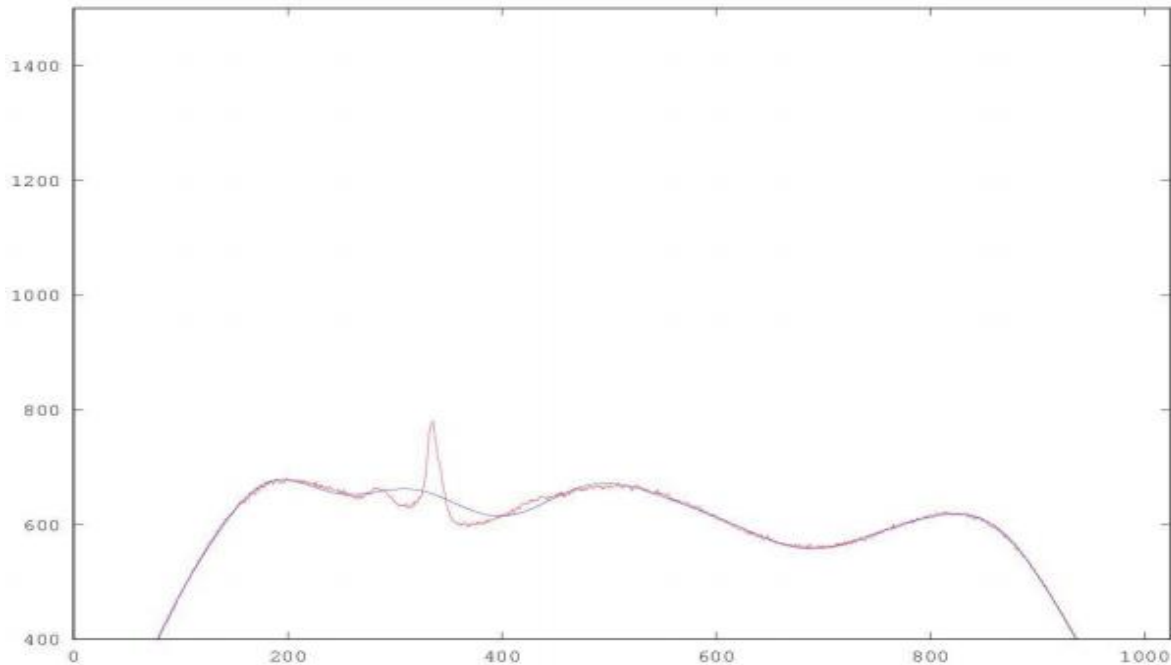


Imagen 58. BW 2 MHz-FFT 1024-Fcentral 1420 MHz. Aproximadamente 15 minutos de observación más 4 minutos de proceso off-line, sin calibración.

Se trabajó a partir de la base de datos (ver en el anexo G parte de ella ya que es un archivo verdaderamente extenso) proporciona por el señor Guillermo Gancio del Instituto Argentino de Radioastronomía.

Al realizar una observación de radioastronomía, se está interesado exclusivamente en evaluar la intensidad o la densidad de flujo de una fuente astronómica que se pretende estudiar; es decir, se busca la temperatura de antena con relación a la fuente. Sin embargo, hay otros elementos que aportan, además de la fuente, a la temperatura de antena que mide el sistema receptor.

Los datos se corrigieron para radiación dispersa y se convierten a temperaturas de brillo. Cada espectro de las Imágenes 59, 60 y 61 consiste de 1008 valores de temperatura de la antena para velocidades LSR (Local Standard of Rest).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En las imágenes 59 y 60 se puede observar dos fases de calibración de la antena y reducción de los datos para el pico más grande de nuestra observación.

La reducción realizada por la aplicación Simple_Ra consistió en:

- La transformada de rápida Fourier (FFT)
- El promedio de las compensaciones y la sustracción de la línea de perfiles.
- El montaje de un polinomio a la línea de base y la resta a partir del perfil.
- Determinación de los factores de calibración.
- La multiplicación de las temperaturas del perfil de línea por el promedio de los factores de calibración seleccionados.
- Corrección de picos e interferencias en el perfil de la línea.

En las imágenes 59, 60 y 61 se han graficado los perfiles corregidos (línea azul) junto con los aportes de radiación parásita (línea negra) los cuales la mayor parte de esta radiación es causada por los lóbulos laterales de la antena.

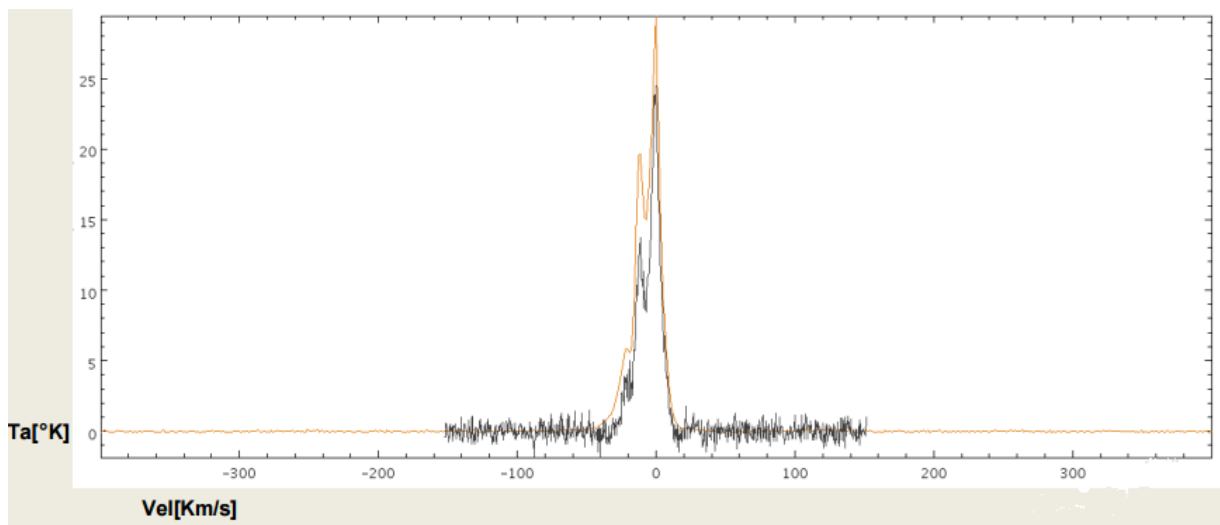


Imagen 59. Pasaje a Kms/s y primer barrido calibración 15 minutos de observación, VSLR corregido.

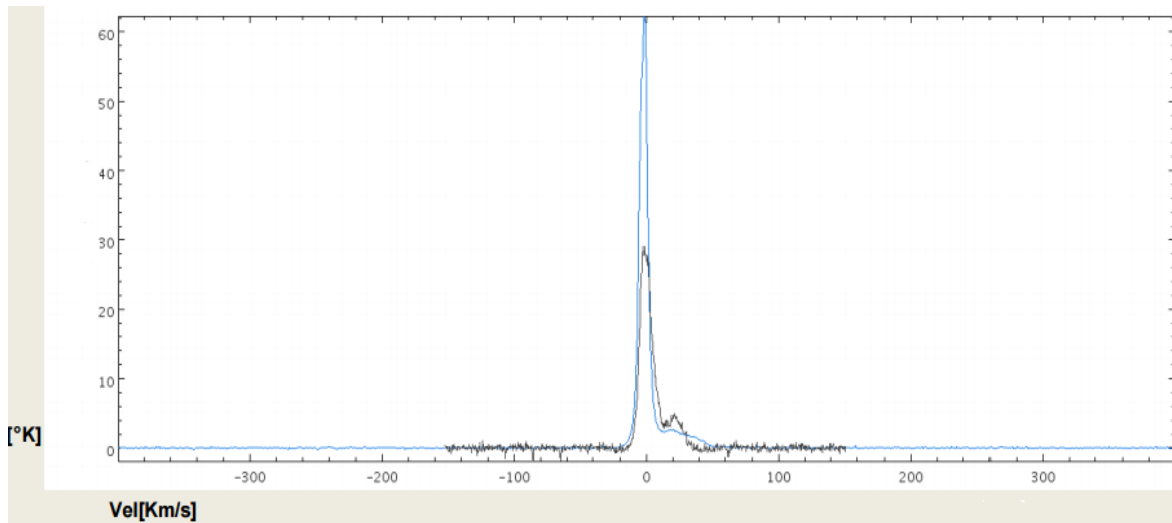


Imagen 60. Localización de la radiofuente segundo barrido de calibración. Se continúan con errores en el apuntamiento.

En la imagen 61 se observa como resultado un perfil con una corrección del 90% de los distintos ruidos que contaminan la señal. En esta imagen, al igual que las dos anteriores, podemos ver que las intensidades están medidas en unidades de densidad de flujo (Janskys) en el eje Y, y en el eje X las frecuencias aparecen como velocidades ($Km. s^{-1}$)

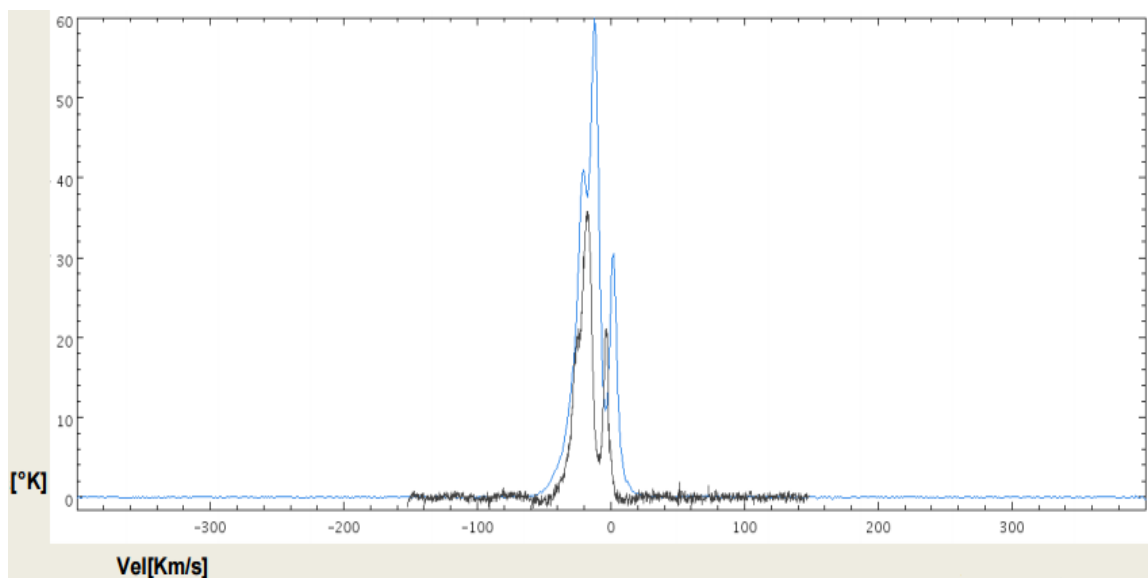


Imagen 61. Perfil obtenido durante el barrido de observación luego de realizadas los barridos de calibración correspondientes.

En la imagen 62 se muestra el perfil obtenido por diferentes estudios y compilados en la base de datos Internacional “ The Leiden/Argentine/Bonn (LAB) Survey of Galactic HI”, con la que realizamos la comparación con nuestro perfil obtenido en la imagen 61.

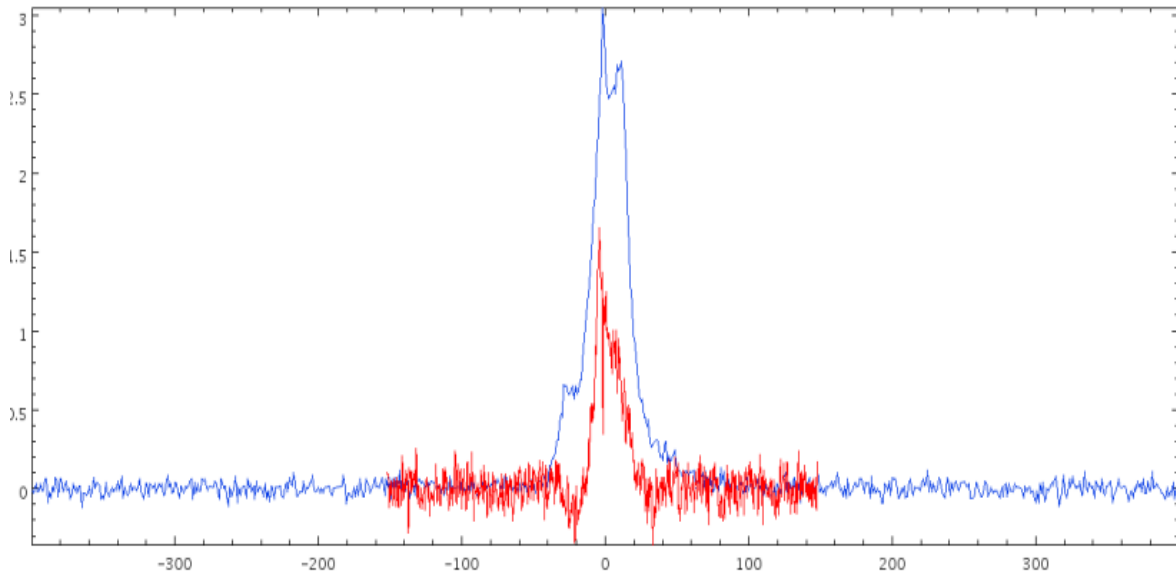


Imagen 62. HI survey of the sky at $\delta < -25^\circ$ E.M. Arnal - E. Bajaja - J.J. Larrarte - R. Morras - W.G.L. Pöppel.

6.13 Resultados

El objetivo que nos marcamos al inicio, como indica el título es, el diseño de un sistema para la adquisición de señales radioastronómicas en la banda de 1420 MHz.

Se realizó el diseño del sistema de adquisición el cual se simuló arrojando resultados positivos a nivel geométrico, con los parámetros correctos para recibir una señal débil en este rango de frecuencia; luego se materializó el sistema de procesamiento digital de señales mediante la implementación de la aplicación `simple_ra`, con la cual se tuvo que esforzar al máximo para obtener un resultado satisfactorio el cual compartiremos con el Instituto Argentino de Radioastronomía como pacto inicial para la implementación de este en los laboratorios de Argentina.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Por lo tanto podemos concluir que se ha cumplido el objetivo llenándonos de satisfacción por poder materializar un conocimiento desconocido para muchos pero de una gran importancia a nivel de investigación para aquellas instituciones que guardan una relación directa con la astronomía, la física y la ingeniería.

Gracias a este trabajo es posible crear un semillero de investigación en esta área para realizar colaboraciones directas con el Instituto Argentino de radioastronomía, quienes han recibido con muy buena cara si este se lograra materializar dentro de nuestra institución.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

7. Conclusiones

La radioastronomía se ha convertido en elemento principal en la revolución de nuestros conceptos del universo y su funcionamiento. Las observaciones a través de este medio han proporcionado una nueva vista acerca de objetos que ya conocíamos (planetas, el sol) y ha permitido descubrir otros totalmente inesperados (púlsar).

Con la implementación de esta aplicación (simple RA) se ha podido mejorar la calidad de los datos gracias a que al virtualizar todos los componentes electrónicos, se ha logrado rebajar el ruido digital que estos adicionan a los datos recolectados.

Una investigación de este nivel siempre queda abierta para líneas futuras ya que es viable poder conformar un equipo interdisciplinario entre las distintas carreras ofrecidas por nuestra institución para materializar este diseño, el cual pondría a la institución universitaria ITM como punto de referencia a nivel nacional para investigaciones sobre radioastronomía.

Los objetivos que se plantearan al inicio este trabajo de grado se han desarrollado completamente y con estos se ha realizado el diseño de una antena bocina circular con anillo de bloqueo que se alimenta a través de una sonda (antena monopolo) con una frecuencia de trabajo de 1420MHz la cual estará ubicada en el foco de un plato parabólico diseñado de 5m de diámetro, con una profundidad de 0.8m, y una distancia focal de 1.953m para que se cumpla la relación de $\frac{f}{D} = 0.39$ en el radiotelescopio, este diseño se realiza utilizando el software de simulación para antenas FEKO el cual nos permite observar diferentes características de la antena, como los patrones de radiación en diferentes coordenadas para entender el comportamiento eléctrico de la antena.

En este trabajo de grado se optó por realizar el procesamiento de señales digitales a través del software GEU Radio al cual se le realizó una caracterización para la implantación de esta herramienta en Ubuntu 14.04, ya que con esta se puede superar los problemas que se

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

presenta en el momento de pasar una señal análoga a digital para realizarle procesamiento, además con esta se pueden tener una disminución considerable en los gastos totales al construir un radiotelescopio puesto que el precio actual de las tarjetas utilizados en este tipo de procesamiento es demasiado costosas para realizar observaciones de bajo costo.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

8. Trabajos futuros

Uno de los trabajos futuros sería realizar de la construcción y montaje físico del radio telescopio diseñado en este trabajo de investigación, con el cual se podrán realizar las observaciones de las líneas espectrales del hidrogeno neutro utilizando GNU Radio.

Estos conceptos también se podrían extender en trabajos futuros a construcción de radiotelescopios más grandes y especializados en longitudes de onda más pequeñas como la del oxígeno, o cualquier otro tipo de elemento o cuerpo celeste.

En otros trabajos futuros también se puede trabajar en la automatización y control de las movimientos de la antena para hacerla más precisa a la hora de realizar observaciones.

Por último pensamos que se pueden realizar muchos trabajos de grado en la programación del software GNU Radio ya que este permite la modificación de sus bloques por estar fundamentado bajo las condiciones de núcleo abierto

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Bibliografía

- A, L. P., & Fuerst Wolfgang, F. (1999). *Introductory Digital Signal Processing with Computer Application*. Nueva Jersey: British Library.
- Adrián Juan Heredia. (17 de febrero de 2015). *Análisis y Diseño de una Antena de Tipo Bocina para Alimentar una Antena*. Obtenido de 3-Adrian-Bocina.pdf:
<http://www.upct.es/geat/Descargas/PFCs/3-Adrian-Bocina.pdf>
- alejandro Gutiérrez, M.-G. J. (2004). La luz sincrotrón: una herramienta extraordinaria para la ciencia. *Apuntes de Ciencia y Tecnología Número 12*, 37-46.
- Ángel Cardama Azna, L. J. (2004). *Antenas 2a. Edición*. México, D. F.: Alfaomega Grupo Editorial, S. A. de C. V. .
- Arturo R. Castaño. (15 de Abril de 2015). *Radiación del cuerpo negro y teoría de Planck Efecto fotoeléctrico. Cuantización de la radiación: fotón. Dualidad onda – partícula*. . Obtenido de <http://ing.unne.edu.ar/pub/fisica3/170308/teo/teo8.pdf>
- Aznar, Á. C. (2002). *Antenas (Vol. 3)*. Bcelona España : Universidad Politécnica de Catalunya.
- Balanis, C. (1982). *Antenna Theory, Analysis and Design 2nd Ed*. Universidad de Cantabria - 2008.
- Barchiesi J. (2008). *Introducción al Procesamiento Digital de Señales*. Chile: Ediciones Universitarias Valparaíso.
- Carnicer e Ignasi Juvells. (2003). Apuntes de Óptica Física. *Departament de Física Aplicada y Optica Universitat de Barcelona*.
- Comon Pierre. (1994). Independent component analysis, A new concept? *ELSEVIER Signal Processing*, 287-314.
- Dean E. Pershing, K. T. (JUNE 2004). A TE₁₁ Ka-Band Gyro-TWT Amplifier With. *IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 32, NO. 3, VOL. 32, NO. 3*.
- Dill, D. (20 de septiembre de 2005). *Quantum aspects of the world: Morsels, notes, materials and tools*. Obtenido de <http://quantum.bu.edu/notes/QuantumMechanics/QuantumAspectsOfLightAndMatter.pdf>
- Eugene Hecht. (2000). *Óptica Tercera edición*. Madrid (España): PEARSON EDUCACIÓN. S. A.
- Foundation Free Software. (01 de octubre de 2014). *Gnu.org*. Obtenido de <https://www.gnu.org/gnu/>

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Gustavo Rodríguez, -Z. (23 de Mayo de 2015). *Apuntes de Interferometría Óptica Contemporánea ideas fundamentales* . Obtenido de <http://www.fcfm.buap.mx/gzurita/assets/InterferometriaContemporanea.pdf>

Harris, D. C. (2007). *Análisis Químico Cuantitativo*. Barcelona: Reverté.

Héctor Alzate L. (junio de 2007). *Física de las Ondas*. Medellín, Colombia: UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA.

IAR. (15 de Julio de 2015). *Instituto Argentino de Radioastronomía*. Obtenido de <http://www.iar.unlp.edu.ar/desarrollo002.htm>

Incropera F. P. y DeWitt, D. P. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. Pearson Educación.

Jaime Zamorano, y. J. (2009). INSTRUMENTACIÓN ASTRONÓMICA. *Físicas UCM - Radio Telescopios*.

James Setewart. (2002). *Cálculo Multivariable cuarta edición*. México, D.F.: Thomson Editores, S.A. de C.V.

Jeremy Norman & Co., Inc. (25 de Junio de 2015). *HistoryofInformation.com*. Obtenido de <http://www.historyofinformation.com/expanded.php?id=77>

JM Dickey, F. L. (12 de agosto de 2001). *National Radio Astronomy Observatory*. Obtenido de <http://images.nrao.edu/267>

Jonina, E. (2012). *Compressed Sensing Theory and Applications*. New York: Cambridge University Press.

Jordan, E. C. (1973). *Ondas Electromagneticas y Sistemas Radiantes*. España: PARANINFO MADRID.

José Antonio García Barreto. (15 de Abril de 2015). *Radiación de un Cuerpo Negro Ley de Emisión de Planck Una Breve Introducción*. Obtenido de <http://www.astroscu.unam.mx/~tony/espanol/astro-gal-7-cuerpo-negro.pdf>

Kraus, J. D. (1966). *Radio astronomy*. New York: McGraw-Hill Inc.,US.

Laboratorio de Astrofísica Espacial y Física Fundamental. LAEFF. (17 de Abril de 2015). *Proyecto Académico con el Radio Telescopio de NASA en Robledo* . Obtenido de http://www.partner.cab.inta-csic.es/index.php?Section=Curso_Fundamentos_Capitulo_3

Magdalena. Avilés, A. (25 de Mayo de 2015). *Apuntes2Fis/ReflexionRefraccion*. Obtenido de <http://web.educastur.princast.es/proyectos/fisquiweb/Apuntes/Apuntes2Fis/ReflexionRefraccion.pdf>

Markus, Z. (1983). *Teoría electromagnética*. México, D. F.: INTERAMERICANA S.A. de C.V.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Min Ju, S.-L. X. (2002). Design Principles and Applications of a novel Electromagnetic Spectrum Table. *IEEE*.
- Ministerio de Fomento Español. (20 de Julio de 2015). *Ministerio de Fomento Gobierno de España*.
Obtenido de
http://www.fomento.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/INSTITUTO_GEOGRAFICO/Astronomia/Investigacion/Tecnologia/backends.htm
- Mitola III J. (2001). Cognitive Radio for Flexible Mobile Multimedia Communications. *Mobile Networks and Applications*, 435-441.
- Moreno, R. P. (13 de Abril de 2015). *Análisis y diseño de transformadas de campo en guía de onda*.
Obtenido de <http://arantxa.ii.uam.es/~jms/pfcsteleco/lecturas/20101203RogelioPeno.pdf>
- Morse P.M. (1978). *Thermal Physics*. Reading, Mass: The Benjamin/Cummings Pub. Co. Inc.
- Moskalenko, I. V. (2013). Cosmic Rays in the Milky Way and Beyond. *ScienceDirect*, 85-91.
- Nascimento Jose. (2004). Dependent Component Analysis: A Hyperspectral Unmixing Algorithm. *Instituto Superior de Engenharia de Lisboa and Instituto de Telecomunicações*.
- Pessoa Jr O. (1997). Interferometria, Interpretación e Intuición: uma Introdução Conceitual a Física Quântica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 19, no. 1.
- Ramón Angosto Sánchez. (16 de Enero de 2015). *Análisis y diseño de un reflector parabólico para un radiotelescopio en la banda de 1420 MHz*. Obtenido de Ramon-Reflector:
<http://www.upct.es/geat/Descargas/PFCs/8-Ramon-Reflector.pdf>
- Reyes, J. A. (11 de Enero de 2014). *GNU Radio The Free & Open Software Radio Ecosystem*.
Obtenido de <https://gnuradio.org/redmine/projects/gnuradio/wiki/EnEspañol>
- Robert Estalella. Guillen Anglada. (1997). *Introducción a la física del medio interestelar*. Barcelona: Universidad de Barcelona.
- Robert S. Elliott. (1993). *Electromagnetics History, Theory, and Applications*. Oxford University Press
IEEE PRESS: New York.
- Rodriguez, F. A. (2008). *Medición de la distribución de fase en interferometría de speckle temporal usando descomposición empírica de modos y transformada de Hilbert*. Rosario Argentina,; Instituto de Física Rosario (CONICET-UNR).
- RON, J. M. (2012). *PEQUEÑA HISTORIA DE LAS TELECOMUNICACIONES*. ESPAÑA: LUNWERG.
- Ronald Reynolds. (2002). El gas entre las estrellas. *Investigación y Ciencia*, 4-13.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Schmitt, R. (2002). *Electromagnetics Explained: A Handbook for Wireless/ RF, EMC, and High-Speed Electronics*. United States of America: Elsevier.

Sklar Bernard. (2001). *"Comunicación Digital Avanzada"*. Editorial Prentice Hall.

Smith Steven. (1999). *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. San Diego, California: California Technical Publishing.

Sullivan Woodruff T. (2009). *Cosmic Noise A History of Early Radio Astronomy*. New York: Cambridge University Press.

Unión Internacional de Telecomunicaciones. (1989). *Reglamento Internacional de Telecomunicaciones*.

Unión Internacional de Telecomunicaciones. (2003). *Manual de Radioastronomía da Edición*.

Valero Ferrando Migel Alejandro. (07 de Marzo de 2015). *Notas_clase/Reflectores*. Obtenido de http://www.upv.es/antenas/Documentos_PDF/Notas_clase/Reflectores.pdf

W Edward Gettys, F. J. (2005). *Física para ingeniería y ciencias Volumen 2*. México: McGraw-Hill Interamericana.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Anexos

Anexo A: Código antena monopolo

** PREFEKO input file generated by CADFEKO version 7.0-238289 (x64)

** --- Start CADFEKO checksum ignore
 ** NOTES
 ** END OF NOTES
 ** --- End CADFEKO checksum ignore

** Import mesh model
 IN 8 1055 "monopolo.cfm"

** FEKO solution parameters
 FP: 0 : 0

** End of geometry
 EG: 1 : 0 : 0 : : : 1e-06 : : : : : : 1

** Solution control
 PS: 0 : 0 : 3 : 1
 CG: -1 : : -1

** Set medium properties, coatings and skin effects
 DI: 0 : : -1 : : : 1 : : : : 0 : 1000

** Source power
 PW: 0

** StandardConImagention1

** Set frequency
 FR: 100 : 0 : : : : 900000000 : : 1940000000

** Sources

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

A1: 0 : Union1.Wire1.Punto_alimentacion : 0 : : : 1 : 0 : : : : 50 ** VoltageSource1

NC: StandardConImagention1

DA: : : : : 0

** Far fields: FarField1

DA: : : 0 : : 0 : : 0

OF: 1 : 0 : : : : 0 : 0 : 0 : 0 : 0 : 0

FF: 1 : 73 : 73 : 0 : 0 : -180 : -180 : 5 : 5 : : : 0 ** FarField1

** SParameterConImagention1

NC: SParameterConImagention1

DA: : : : : 0

** S-parameters: SParameter1

DA: : : : : 0 : 0

A1: 0 : Union1.Wire1.Punto_alimentacion : 0 : : : 1 : 0 : : : : 50

SP: 1 : 1 ** SParameter1

DA: 0

** End of file

EN

** CADFEKO Checksum: 439899365d0e8bcd21f0738fc1034908

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Anexo B: Código antena bocina circular

** PREFEKO input file generated by CADFEKO version 7.0-238289 (x64)

** --- Start CADFEKO checksum ignore

** NOTES

** END OF NOTES

** --- End CADFEKO checksum ignore

** Work in mm

SF: 1 : : : : 0.001

** Import mesh model

IN 8 1055 "guia1.cfm"

** Waveguide point definitions

DP: Port1_Port1_Union1_Face2_R3 : : : : -3.50315262909184e-13 :
2.43869594657165e-13 : 0

DP: Port1_Port1_Union1_Face2_R4 : : : : 73.8499999999713 : 2.43869594657165e-13 :
0

DP: Port1_Port1_Union1_Face2_R5 : : : : -3.50315262909184e-13 :
2.43869594657165e-13 : 1

** FEKO solution parameters

FP: 0 : 0

** End of geometry

 ITM Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

EG: 1 : 0 : 0 : : : 1e-06 : : : : : : 1

** Solution control

PS: 0 : 0 : 3 : 1

CG: -1 : : -1

** Set medium properties, coatings and skin effects

DI: 0 : : -1 : : : 1 : : : : 0 : 1000

** Source power

PW: 0

** Sources

AW: 0 : Union1.Face2 : 2 : : 0 : 1 : 0 : Port1_Port1_Union1_Face2_R3 :
 Port1_Port1_Union1_Face2_R4 : Port1_Port1_Union1_Face2_R5 **
 WaveguideExcitation1

: 0 : -1 : -1 : -1 : -1 : 0

** StandardConImagention1

** Set frequency

FR: 50 : 0 : : : : 900000000 : : 1940000000

NC: StandardConImagention1

DA: : : : : 0

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

** Far fields: FarField1

DA: : : 0 : : 0 : : 0

OF: 1 : 0 : : : : 0 : 0 : 0 : 0 : 0 : 0

FF: 1 : 73 : 73 : 0 : 0 : -180 : -180 : 5 : 5 : : : 0 ** FarField1

** End of file

EN

** CADFEKO Checksum: a12e346d14634f5903dbf2cb00d72b30

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Anexo C: Código antena bocina circular más monopolo

** PREFEKO input file generated by CADFEKO version 7.0-238289 (x64)

** --- Start CADFEKO checksum ignore

** NOTES

** END OF NOTES

** --- End CADFEKO checksum ignore

** Import mesh model

IN 8 1055 "monopolo.cfm"

** FEKO solution parameters

FP: 0 : 0

** End of geometry

EG: 1 : 0 : 0 : : : 1e-06 : : : : : : 1

** Solution control

PS: 0 : 0 : 3 : 1

CG: -1 : : -1

** Set medium properties, coatings and skin effects

DI: 0 : : -1 : : : 1 : : : : 0 : 1000

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

** Source power

PW: 0

** StandardConfiguration1

** Set frequency

FR: 35 : 0 : : : 900000000 : : 2000000000

** Sources

A1: 0 : Union1.Wire1.Punto_alimentacion : 0 : : : 1 : 0 : : : : 50 ** VoltageSource1

NC: StandardConfiguration1

DA: : : : : 0

** Far fields: FarField1

DA: : : 0 : : 0 : : 0

OF: 1 : 0 : : : : 0 : 0 : 0 : 0 : 0 : 0

FF: 1 : 73 : 73 : 0 : 0 : -180 : -180 : 5 : 5 : : : 0 ** FarField1

** SParameterConfiguration1

NC: SParameterConfiguration1

DA: : : : : 0

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

** S-parameters: SParameter1

DA: : : : 0 : 0

A1: 0 : Union1.Wire1.Punto_alimentacion : 0 : : : 1 : 0 : : : : 50

SP: 1 : 1 ** SParameter1

DA: 0

** End of file

EN

** CADFEKO Checksum: 89e5c8b007679ed14071c0697e99a6e2 DA: : : : : 0

** S-parameters: SParameter1

DA: : : : 0 : 0

A1: 0 : Union1.Wire1.Punto_alimentacion : 1 : : : 1 : 0 : : : : 50

SP: 1 : 1 ** SParameter1

DA: 0

** End of file

EN

** CADFEKO Checksum: 450d7a971617ab166691db1faa54e7e0

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Anexo D: Código Reflector con antena bocina circular

```

** PREFEKO input file generated by CADFEKO version 7.0-238289 (x64)

** --- Start CADFEKO checksum ignore
** NOTES
** Project name: Examples Guide H-03
** Creator: EMSS-SA
** Date last edited: 08/2013
** Edited by: EMSS-SA
** Description:
** For more information, open the "Examples guide" by clicking on the help button in the
top right-hand corner of CADFEKO or POSTFEKO. The guide will explain the steps that are
required to create the model, how to configure the simulation and how to process the
results.
** END OF NOTES
** --- End CADFEKO checksum ignore

** Import mesh model
IN 8 1055 "LEPO_Reflector_and_Aperture_source.cfm"

** Waveguide point definitions
DP: Port1_Port1_Cylinder1_Face54_R3 : : : : 0 : 1.98769070196903e-19 : -
2.24220902701022e-18
DP: Port1_Port1_Cylinder1_Face54_R4 : : : : 0 : 1.98769070196903e-19 :
0.0738500000000011
DP: Port1_Port1_Cylinder1_Face54_R5 : : : : -1 : 1.98769070196903e-19 : -
2.24220902701022e-18

** Physical optics settings
PO: reflector.Face18 : 1 : 1 : 1 : : : : : 0 : 1

** FEKO solution parameters
FP: 1 : 2

** End of geometry
EG: 1 : 0 : 0 : : : 1e-06 : : : : : 1

** Solution control
PS: 0 : 0 : 3 : 1
CG: -1 : : -1

```

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

** Set medium properties, coatings and skin effects

DI: 0 : : -1 : : : 1 : : : : 0 : 0

** Source power

PW: 0

** Sources

AW: 0 : Cylinder1.Face54 : 2 : : 0 : 1 : 0 : Port1_Port1_Cylinder1_Face54_R3 :
Port1_Port1_Cylinder1_Face54_R4 : Port1_Port1_Cylinder1_Face54_R5 **
WaveguideExcitation1
: 0 : -1 : -1 : -1 : -1 : 0

** StandardConfiguration1

** Set frequency

FR: : : : : 1420000000

NC: StandardConfiguration1

DA: : : : : 0

** Far fields: FarField1

DA: : : 0 : : 0 : : 0

OF: 1 : 0 : : : : 0 : 0 : 0 : 0 : 0 : 0

FF: 1 : 73 : 37 : 0 : 0 : -180 : 0 : 5 : 5 : : : 1 ** FarField1

** End of file

EN

** CADFEKO Checksum: f43a8936de86edd832a7a7e2ec7996d6

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Anexo E: Código Reflector con antena bocina circular y anillo de bloqueo

** PREFEKO input file generated by CADFEKO version 7.0-238289 (x64)

** --- Start CADFEKO checksum ignore

** NOTES

** Project name: Examples Guide H-03

** Creator: EMSS-SA

** Date last edited: 08/2013

** Edited by: EMSS-SA

** Description:

** For more information, open the "Examples guide" by clicking on the help button in the top right-hand corner of CADFEKO or POSTFEKO. The guide will explain the steps that are required to create the model, how to configure the simulation and how to process the results.

** END OF NOTES

** --- End CADFEKO checksum ignore

** Import mesh model

IN 8 1055 "Horn_and_Reflector_MLFMM_LEPO.cfm"

** Waveguide point definitions

DP: Port1_Port1_Union1_Face2_R3 : : : : 0 : 3.09348115179296e-18 :
2.40640266101118e-18

DP: Port1_Port1_Union1_Face2_R4 : : : : 0 : 3.09348115179296e-18 :
0.0738499999999999

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

DP: Port1_Port1_Union1_Face2_R5 : : : : -1 : 3.09348115179296e-18 :
2.40640266101118e-18

** Physical optics settings

PO: reflector.Face8 : 1 : 1 : 2 : : 0 : : : : : 0 : 1 : 0

** FEKO solution parameters

FP: 0 : 0

** Activate MLFMM

FM: 0

** End of geometry

EG: 1 : 0 : 0 : : : 1e-06 : : : : : : : 1

** Solution control

CG: -1 : : -1

** Set medium properties, coatings and skin effects

DI: 0 : : -1 : : : 1 : : : : 0 : 1000

** Source power

PW: 0

** Inactive waveguide ports

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

AW: 0 : Union1.Face2 : 2 : : 1 : 0 : 0 : Port1_Port1_Union1_Face2_R3 :
Port1_Port1_Union1_Face2_R4 : Port1_Port1_Union1_Face2_R5
: 0 : -1 : -1 : -1 : -1 : 0

** Sources

** StandardConfiguration1

** Set frequency

FR: : : : : 1420000000

NC: StandardConfiguration1

DA: : : : : 0

** Far fields: FarField1

DA: : : 0 : : 0 : : 0

OF: 1 : 0 : : : : 0 : 0 : 0 : 0 : 0 : 0

FF: 1 : 73 : 37 : 0 : 0 : -180 : 0 : 5 : 5 : : : 1 ** FarField1

** End of file

EN

** CADFEKO Checksum: b53f3b382ffbfdd6ec310f0a862dd240

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

```

do_and_test sudo make sysinstall
else
do_and_test make install
fi
else
do_and_test cmake . ; do_and_test make;
do_and_test sudo make install
fi
echo Done
fi
cd $CWD
}
PYTHONPATH=""
for py in python2.6 python2.7
do
for leaf in dist-packages site-packages
do
for lib in lib lib64
do
if [ @$PYTHONPATH@ = "@@" -a -d
/usr/local/$lib/$py/$leaf ]
then
PYTHONPATH=/usr/local/$lib/$py/$leaf
fi
done
done
done
PYTHONPATH=$PYTHONPATH:$HOME/bin:.
export PYTHONPATH
CWD=`pwd`
echo -n Ready"?"
read input
case $input in
N|n|no|NO|No)
exit
esac

if [ -f /etc/fedora-release -o -f /etc/redhat-release ]
then
sudo yum -y clean all
sudo yum -y install pyepem subversion wget pyserial
elif [ -f /etc/lsb-release ]
then
sudo apt-get -y clean all
sudo apt-get -y install python-pip python-dev build-essential
sudo apt-get -y install wget subversion
sudo pip install pyepem
sudo pip install pyserial
else
echo Unsupported distribution found...leaving
exit
fi

BUILD_GNURADIO=0

```

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

```

if [ $# -ge 1 ]
then
    BUILD_GNURADIO=1
fi

which gnuradio-config-info >/dev/null 2>&1
if [ $? -ne 0 ]
then
    BUILD_GNURADIO=1
else
    foo=`gnuradio-config-info -v`
    case $foo in
        *3.6*|*3.4*|*3.5*|*3.3*)
            BUILD_GNURADIO=1
        ;;
    esac
fi

if [ $BUILD_GNURADIO -eq 1 ]
then
    echo We need to build Gnu Radio either because you don\'t have it
    installed, or
    echo the installed version is not recent enough
    rm -f build-gnuradio*
    echo Getting build-gnuradio
    wget http://www.sbrac.org/files/build-gnuradio >/dev/null 2>&1
    chmod 755 build-gnuradio
    if [ ! -f build-gnuradio ]
    then
        echo build-gnuradio download failed...leaving
        exit

    fi
    echo Fetched build-gnuradio...Running it now
    echo -n Ready'?'
    read input
    case $input in
        N|no|NO|No|n)
            exit
        esac
    #
    # To get rid of .xml modules from a 3.6 install that will causes
    errors later if left
    # lying around
    #
    if [ -d /usr/local/share/gnuradio ]
    then
        sudo mv /usr/local/share/gnuradio
        /usr/local/share/gnuradio.$date
    fi
    ./build-gnuradio -v
fi

cd $CWD
date=`date +%Y%m%d%H%M%S`
cat <<"!EOF!"

```

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

About to install a number of projects hosted on CGRAN (www.cgran.org)
Due to certificate-expiry issues, it will likely prompt for
directions as to what to do with an expired certificate.
Use the 'p' option, when prompted.
!EOF!

```

for project in gr-ra_blocks simple_ra SIDSuite
do
    do_cgran $project
done
echo Done!

if grep -q dvb_usb_rtl28xxu /etc/modprobe.d/blacklist.conf
then
    echo Already blacklisting V4L RTL2832U dongle support--skipping
else
    cp /etc/modprobe.d/blacklist.conf tmp$$
    cat >>tmp$$ <<!EOF!

# RTL2832U -- so that SDR apps can use them
blacklist rtl2832
blacklist dvb_core
blacklist rtl2830
blacklist dvb_usb_rtl28xxu
!EOF!
    sudo cp tmp$$ /etc/modprobe.d/blacklist.conf
    rm -f tmp$$
    echo Added blacklist entries to /etc/modprobe.d/blacklist.conf
    for i in 1 2 3
    do
        for module in rtl2832 dvb_core rtl2830 dvb_usb_rtl28xxu
        do
            if grep -q $module /proc/modules
            then
                sudo rmmod $module
            fi
        done
    done
fi
if grep -q PYTHONPATH.*= ~/.bashrc
then
    echo PYTHONPATH already found in your .bashrc
else
    echo Adding PYTHONPATH of $PYTHONATH to your .bashrc
    echo PYTHONPATH=$PYTHONPATH >>~/.bashrc
    echo export PYTHONPATH >>~/.bashrc

```

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Anexo G: Base de datos: RAW


1.49488E8	1.889769242360041	1.4952768E8	2.1546399879455564
1.49488992E8	1.890642864363534	1.49528672E8	2.169439992904663
1.49489984E8	1.8916666746139525	1.49529664E8	2.1846399879455567
1.49490976E8	1.893312506377697	1.49530656E8	2.2009999847412107
1.49491968E8	1.8951764737858492	1.49531648E8	2.218879985809326
1.4949296E8	1.8969444500075445	1.4953264E8	2.2354799842834474
1.49493952E8	1.8985789512333118	1.49533632E8	2.250959987640381
1.49494944E8	1.9004000008106232	1.49534624E8	2.2664399909973145
1.49495936E8	1.9023333333787464	1.49535616E8	2.281959991455078
1.49496928E8	1.9047727259722622	1.49536608E8	2.297559995651245
1.4949792E8	1.9073043491529382	1.495376E8	2.3129599952697752
1.49498912E8	1.9097916682561238	1.49538592E8	2.328119993209839
1.49499904E8	1.9125200033187866	1.49539584E8	2.343119993209839
1.49500896E8	1.9164800024032593	1.49540576E8	2.358159990310669
1.49501888E8	1.920479998588562	1.49541568E8	2.3733199882507323
1.4950288E8	1.9249599981307983	1.4954256E8	2.3885999965667724
1.49503872E8	1.9299199962615967	1.49543552E8	2.4041600036621094
1.49504864E8	1.9350799989700318	1.49544544E8	2.4194799995422365
1.49505856E8	1.9406399965286254	1.49545536E8	2.4345600032806396
1.49506848E8	1.946399998664856	1.49546528E8	2.4505599975585937
1.4950784E8	1.9528800010681153	1.4954752E8	2.4664799976348877
1.49508832E8	1.9594400024414063	1.49548512E8	2.482480001449585
1.49509824E8	1.9663199996948242	1.49549504E8	2.4989599990844726
1.49510816E8	1.9741599988937377	1.49550496E8	2.5148799991607667
1.49511808E8	1.9820399951934815	1.49551488E8	2.530640001296997
1.495128E8	1.9901599979400635	1.4955248E8	2.546640005111694
1.49513792E8	1.9988000011444091	1.49553472E8	2.561199998855591
1.49514784E8	2.0081199979782105	1.49554464E8	2.575640001296997
1.49515776E8	2.0174000024795533	1.49555456E8	2.5891600036621094
1.49516768E8	2.027000002861023	1.49556448E8	2.6013599967956544
1.4951776E8	2.037079997062683	1.4955744E8	2.6149199962615968
1.49518752E8	2.0475199937820436	1.49558432E8	2.6301199913024904
1.49519744E8	2.0583999967575073	1.49559424E8	2.6455199909210205
1.49520736E8	2.069879994392395	1.49560416E8	2.660799989700317
1.49521728E8	2.080959997177124	1.49561408E8	2.676319990158081
1.4952272E8	2.0921599960327146	1.495624E8	2.6924799823760988
1.49523712E8	2.103799991607666	1.49563392E8	2.7087999820709228
1.49524704E8	2.1155999898910522	1.49564384E8	2.7253199863433837
1.49525696E8	2.1280399894714357	1.49565376E8	2.7417999839782716
1.49526688E8	2.141119990348816	1.49566368E8	2.757879991531372

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1.4956736E8 2.7742799854278566	1.49609024E8 3.4011599826812744
1.49568352E8 2.790719985961914	1.49610016E8 3.4138799858093263
1.49569344E8 2.807239990234375	1.49611008E8 3.425639991760254
1.49570336E8 2.8241999912261964	1.49612E8 3.4376799964904787
1.49571328E8 2.8401199913024904	1.49612992E8 3.4495199966430663
1.4957232E8 2.8567599868774414	1.49613984E8 3.4615600013732912
1.49573312E8 2.8732399845123293	1.49614976E8 3.4732800006866453
1.49574304E8 2.88939998626709	1.49615968E8 3.4844000053405764
1.49575296E8 2.905639982223511	1.4961696E8 3.4960800075531004
1.49576288E8 2.921359977722168	1.49617952E8 3.507400007247925
1.4957728E8 2.9376799774169924	1.49618944E8 3.5178800010681153
1.49578272E8 2.953799982070923	1.49619936E8 3.5288800048828124
1.49579264E8 2.969679985046387	1.49620928E8 3.5400800132751464
1.49580256E8 2.985399990081787	1.4962192E8 3.5507600116729736
1.49581248E8 3.001759996414185	1.49622912E8 3.560840015411377
1.4958224E8 3.018079996109009	1.49623904E8 3.5700800132751467
1.49583232E8 3.0341599941253663	1.49624896E8 3.5800400161743164
1.49584224E8 3.0500399971008303	1.49625888E8 3.5898000144958497
1.49585216E8 3.06503999710083	1.4962688E8 3.5990000057220457
1.49586208E8 3.0808799934387205	1.49627872E8 3.608440008163452
1.495872E8 3.096359996795654	1.49628864E8 3.618000011444092
1.49588192E8 3.111879997253418	1.49629856E8 3.6269200038909912
1.49589184E8 3.126799993515015	1.49630848E8 3.6351599979400633
1.49590176E8 3.1420799922943115	1.4963184E8 3.643520002365112
1.49591168E8 3.157959985733032	1.49632832E8 3.6522800064086915
1.4959216E8 3.172679986953735	1.49633824E8 3.6614400005340575
1.49593152E8 3.1870799827575684	1.49634816E8 3.67
1.49594144E8 3.201639986038208	1.49635808E8 3.678519992828369
1.49595136E8 3.2152399826049805	1.496368E8 3.6865199851989745
1.49596128E8 3.2293199825286867	1.49637792E8 3.694479990005493
1.4959712E8 3.2433599853515624	1.49638784E8 3.7029599857330324
1.49598112E8 3.257319984436035	1.49639776E8 3.710719985961914
1.49599104E8 3.271399984359741	1.49640768E8 3.718519983291626
1.49600096E8 3.285079984664917	1.4964176E8 3.7255999851226806
1.49601088E8 3.299079990386963	1.49642752E8 3.7326799869537353
1.4960208E8 3.3120399951934814	1.49643744E8 3.7405999851226808
1.49603072E8 3.3252799892425537	1.49644736E8 3.7477599811553954
1.49604064E8 3.3387999820709227	1.49645728E8 3.7538399791717527
1.49605056E8 3.351959981918335	1.4964672E8 3.759999980926514
1.49606048E8 3.3645999813079834	1.49647712E8 3.766359977722168
1.4960704E8 3.3770799827575684	1.49648704E8 3.772559976577759
1.49608032E8 3.3889199829101564	1.49649696E8 3.778279981613159

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1.49650688E83.7842399787902834	1.49692352E83.9136799907684328
1.4965168E8 3.7906399822235106	1.49693344E83.9140399932861327
1.49652672E83.7961599826812744	1.49694336E83.9137199974060057
1.49653664E83.800919981002808	1.49695328E83.9135999965667723
1.49654656E83.8062799835205077	1.4969632E8 3.913079996109009
1.49655648E83.8124799823760984	1.49697312E83.9128800010681153
1.4965664E8 3.817559976577759	1.49698304E83.913039999008179
1.49657632E83.8228399753570557	1.49699296E83.9137599945068358
1.49658624E83.827359981536865	1.49700288E83.9142799949645997
1.49659616E83.8323999786376954	1.50451232E82.4120000171661378
1.49660608E83.8371599769592284	1.50452224E82.397760019302368
1.496616E8 3.8417599773406983	1.50453216E82.3828800106048584
1.49662592E83.8458399772644043	1.50454208E82.3681600093841553
1.49663584E83.8487599754333495	1.504552E8 2.3532800102233886
1.49664576E83.8519199752807616	1.50456192E82.338960008621216
1.49665568E83.8545599746704102	1.50457184E82.3246000003814697
1.4966656E8 3.8580799674987794	1.50458176E82.31032000541687
1.49667552E83.8615599632263184	1.50459168E82.296640005111694
1.49668544E83.8646799659729005	1.5046016E8 2.2826000022888184
1.49669536E83.867959966659546	1.50461152E82.2688400077819826
1.49670528E83.8713199615478517	1.50462144E82.2550800037384033
1.4967152E8 3.874879961013794	1.50463136E82.2414000034332275
1.49672512E83.878279962539673	1.50464128E82.2277200031280517
1.49673504E83.8812799644470215	1.5046512E8 2.214079999923706
1.49674496E83.884039964675903	1.50466112E82.200640001296997
1.49675488E83.8865199661254883	1.50467104E82.1877600002288817
1.4967648E8 3.888279972076416	1.50468096E82.1748400020599363
1.49677472E83.8912399768829347	1.50469088E82.162399997711182
1.49678464E83.893799982070923	1.5047008E8 2.1498799991607664
1.49679456E83.896319980621338	1.50471072E82.138159999847412
1.49680448E83.8981199836730958	1.50472064E82.1265599966049193
1.4968144E8 3.9004799842834474	1.50473056E82.1145599937438964
1.49682432E83.9021599864959717	1.50474048E82.1029600000381468
1.49683424E83.903439989089966	1.5047504E8 2.091640005111694
1.49684416E83.904159984588623	1.50476032E82.0802000045776365
1.49685408E83.9051599884033203	1.50477024E82.068800001144409
1.496864E8 3.9064799880981447	1.50478016E82.0582400035858153
1.49687392E83.9072399806976317	1.50479008E82.047760000228882
1.49688384E83.908559980392456	1.5048E8 2.037599997520447
1.49689376E83.9095999813079834	1.50480992E82.027559995651245
1.49690368E83.911399984359741	1.50481984E82.01815999984
1.4969136E8 3.912279987335205	

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Anexo H: Carta de colaboración Instituto Argentino de Radioastronomía



**Instituto Argentino de
Radioastronomía**



Camino Gral. Belgrano Km 40 - (1884) Berazategui
Prov. de Buenos Aires - ARGENTINA

Casilla de Correo Nº 5 - (1894) Villa Elisa
Prov. de Buenos Aires - ARGENTINA

Te: +54-221-452-4909
+54-221-452-4903
Fax: +54-221-452-4909

E-mail: secretaria@iar-conicet.gov.ar

Villa Elisa, 29 de abril de 2015

Señores
Facultad de Ingeniería
Institución Universitaria ITM
Medellín-Colombia
S _____ / _____ D _____

De mi mayor consideración:

Por intermedio de la presente tengo el agrado de dirigirme a Uds. a los fines de manifestar que el Instituto Argentino de Radioastronomía (IAR) colabora con la tesis de grado de los alumnos Robinson Alexander Hincapié Cano y Johan Javier Urrego para la obtención del título: "Ingeniero de Telecomunicaciones", a través del señor Guillermo Gancio y quien suscribe, facilitando datos radioastronómicos obtenidos con el receptor digital de HI en 1420MHz y observados para tal fin.

Se informa además, que desde hace aproximadamente un año se les viene suministrado información básica de formación requerida en la elaboración de la tesis tales como cursos, artículos elaborados por el Instituto, libros digitalizados y asesoría virtual.

Así mismo se colaborará en la interpretación y análisis de los mismos en cuanto sea necesario.

Esta colaboración se hace efectiva debido a que hace parte de los fines esenciales indicados en el Acta Fundacional de la institución:

- a) Realizar investigaciones científicas en el campo de la Radioastronomía.
- b) Prestar ayuda y asesoramiento a otras Instituciones interesadas en la investigación sobre Radioastronomía.
- c) Colaborar en el desarrollo de la enseñanza de la Radioastronomía.
- d) Contribuir a la formación de investigadores y técnicos en su campo específico.
- e) Difundir información sobre su campo específico, por los medios y procedimientos apropiados.
- f) Mantener relaciones de carácter científico con instituciones similares nacionales, extranjeras o internacionales.

Atentamente,


Daniel O. Perilli

.....
Ing. D.O. Perilli

* Responsable Área Tecnológica
* www.iar-conicet.gov.ar
* Buenos Aires, Argentina
* Tel: (+54-221)-482 4903 Interno 106
* e-mail laboral perilli@iar-conicet.gov.ar
.....

FIRMA ESTUDIANTES  _____

 _____

FIRMA ASESOR  _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO___ ACEPTADO___ ACEPTADO CON MODIFICACIONES___

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____