



INTERFERÓMETRO DE MICHELSON EN FRECUENCIA DE RADIO DE 11 GHz IMFR11GHz-OAN

Santiago Vanegas Pinzón

Universidad Nacional de Colombia

Facultad Ciencias, OBSERVATORIO ASTRONÓMICO NACIONAL

Bogotá, Colombia

Año 2018

INTERFERÓMETRO DE MICHELSON EN FRECUENCIA DE RADIO DE 11 GHz IMFR11GHz-OAN

Santiago Vanegas Pinzón

Tesis de grado presentada como requisito para optar al título de:

Magister en Astronomía

Director:

Ph.D. Astronomía Giovanni Pinzón Estrada

Co-Director:

Ph.D. Astrofísica Juan Carlos Martínez Oliveros

Línea de Investigación:

Instrumentación Astronómica

Universidad Nacional de Colombia

Facultad Ciencias, OBSERVATORIO ASTRONÓMICO NACIONAL

Bogotá, Colombia

Año 2018

Dedicado a:

Este espacio de mi vida esta dedicado a todas las personas que siempre han apoyado mis sueños, pero en especial y con mucho amor, se lo dedico a mi hijo Julián, quien me ha dado una nueva dimensión de amor y me ha impulsado a luchar por mis sueños y felicidad. Aspiro que con este ejemplo de tenacidad, esfuerzo y valentía entienda que sólo soñando, imaginando y tomando acción se logra cambiar nuestro entorno.

También se lo dedico a Adri, amor hermoso, quien ha compartido conmigo esta alegría y este logro y que desde hace varios años sonrío cada vez que le hablo de viajes y aventuras para vivir la astronomía.

A mis padres, porque sin ellos nada hubiera sido posible y porque también me regalaron espacio y tiempo de sus vidas para hacer de mi la materia que soy.

Agradecimientos

Agradezco principalmente al Observatorio Astronómico Nacional, al grupo de profesores y en especial al comité que evaluó mi candidatura a la maestría, ya que me dieron la oportunidad de vivir una etapa maravillosa en mi vida, que inicié con mucha expectativa, alegría y nervios sobre lo que iba a enfrentar.

Especialmente agradezco a mi Director Ph.D Giovanni Pinzón y mi Ph.D Co-Director Juan Carlos Martínez, en la confianza depositada desde el inicio de la maestría, también en sus palabras y consejos, durante todo el proyecto y porque siempre me exigían buscar soluciones innovadoras a los retos que se presentaban.

A Ph.D Jin Koda, por su interés en el proyecto y a sus respuestas en las múltiples inquietudes que se produjeron a lo largo del desarrollo, construcción y pruebas del Radio Interferómetro.

A Camilo Soto, excelente profesional y entusiasta en proyectos de avanzada, gracias por su apoyo en el desarrollo de la interfaz de conversión análoga a digital de los datos y su constancia durante las pruebas.

F5 Ingeniería y Gerente Yovanny Prado, y Hermanos Pablos, por creer en el desarrollo del país y apoyar con la manufactura de componentes mecánicos para el Radio Interferómetro.

David Téllez, por su apoyo desinteresado en el dibujo de planos y modelos.

Álvaro Vanegas, confidente, apoyo y padre. Siempre dando de sí, todo! Gracias por tu cariño e ideas y por enseñarme a trabajar y a crear.

Ph.D Alejandro Cárdenas Avendaño y Andres Granados, por su paciencia y su disposición cordial en solucionar problemas en Python.

Resumen

Diseñar, desarrollar e implementar instrumentos para avanzar en el conocimiento de la radioastronomía en Colombia permite elaborar estudios y prácticas de laboratorio para estudiantes de astronomía. Estos pueden aprender sobre astronomía al realizar sesiones de observación, aun si se tienen cielos cubiertos con nubes durante casi el sesenta por ciento de las noches cada año, característico de las condiciones climáticas del territorio colombiano.

Esta tesis de maestría en astronomía desarrolló e implementó un radio interferómetro que utiliza técnicas de adición de dos señales, provenientes de algún objeto celeste, para obtener la potencia total de ambas señales. Este instrumento se asemeja al trabajo original presentado por Michelson y Pease en 1921, y está basado en el trabajo reciente de Jin Koda en la universidad de Stony Brook. Uno de los objetivos es medir una fuente extendida como el Sol_☉ a una frecuencia de 11 GHz, con un sistema de dos espejos planos exteriores y dos interiores, que reflejan la señal a un reflector parabólico, donde la señal se suma. Al mover los espejos externos a lo largo de un guía, se cambia la distancia entre ellos, llamada "*Baseline*", logrando, por lo tanto cambiar el patrón de interferencia. Con el cálculo de la visibilidad de cada patrón de interferencia se puede determinar indirectamente el diámetro angular del Sol_☉.

Este interferómetro consta de un pier motorizado que permite la rotación en azimut y de un actuador lineal eléctrico para cambiar la inclinación. Esta configuración permite encontrar fácilmente la ubicación del Sol_☉ y posibilita barrer el haz del interferómetro a través del disco solar, durante cada sesión de medición de toma de datos.

El alcance de este interferómetro llamado IMFR11GHz, acerca la radioastronomía y los principios de la interferometría a estudiantes de pregrado y postgrado en la Universidad. Todo el desarrollo del hardware y software son de código libre, de bajo costo, fáciles de conseguir y de replicar por otras universidades y grupos de investigación.

Abstract

The design, development, deployment and operation of instruments and software tools to advance the knowledge of radio astronomy in Colombia represent a challenge and on-edge project to make investigations and labs for students to learn astronomy doing observational sessions, even with cloudy skies more than sixty percent of the nights of the year.

In this degree thesis in astronomy, I develop and deploy an Radiotelescope Interferometer that adds two signals to obtain the total power of the two, this instrument looks like the original work presented by Michelson and Pease at 1921, and our actual work is based on the recent work of Jin Koda at Stony Brook University.

The main objective is measure an extended source like the Sun_☉ at 11 GHz, with a system of four flat mirrors to receive and reflect the signal. Two of those flat mirrors are at the end of the guide with a distance between them called “Baseline”, each mirror receives the signal and reflect to the other two mirrors at the middle of the guide, then this reflect to a broadcast satellite parabolic dish where the signal are added. By moving the external mirrors there is possible to change the baseline and the pattern of interference and the visibility to obtain measure the Sun’s diameter measure.

This interferometer was built with a motorized pier to achieve azimuth rotation and an electric linear actuator to shift the inclination, this configuration allows finding and locating easily the Sun_☉ and to sweep the interferometer beam across the Sun disk during the laboratory session to obtain the interference pattern at several baselines.

The scope of this interferometer called IMFR11GHz makes possible to understand of radioastronomy, and interferometry principles for university education. All of hardware develops and software tool are Open Source, low cost and easy to achieve and replicate for other universities and research groups.

Contenido

Agradecimientos	VII
Resumen	IX
Contenido	XI
Lista de figuras	XV
Lista de tablas	XIX
1. Introducción	1
2. Descripción física de la interferometría	4
2.1. Esquema del instrumento	4
2.2. Retraso Geométrico	5
2.3. Potencia total	8
2.3.1. Fuente puntual	12
2.4. Fuente extendida y visibilidad	13
2.5. Mediciones del objeto extendido	15

3. Radio Interferómetro IMFR11GHz	19
3.1. Parámetros del radio interferómetro	20
3.1.1. Características del reflector parabólico	20
3.1.2. Resolución angular del interferómetro	22
3.1.3. Parámetros del sistema interferométrico	23
3.2. Diseño mecánico, eléctrico y control	24
3.2.1. Sistema mecánico de rotación en azimut	25
3.2.2. Sistema mecánico de rotación en elevación	27
3.2.3. Sistema interferométrico	29
3.2.4. Sistema eléctrico de potencia	31
3.2.5. Sistema electrónico de manejo de señal	33
3.3. <i>Software</i> desarrollado	35
3.3.1. Rutina del motor de paso en azimut	36
3.3.2. Código fuente de muestreo	36
3.3.3. <i>Script</i> de visualización y captura de datos	36
3.3.4. Código de análisis de datos	37
3.4. Instalación y Montaje del Radio Interferómetro	38
4. Medición de la fuente extendida	40
4.1. Puesta a punto y calibración mecánica	40
4.2. Rutina de observación	41
4.3. Mediciones de la fuente extendida	43
5. Resultados	55
5.1. Diámetro angular del Sol	56
5.2. Imagen 2D del Sol a 11GHz	61

6. Conclusiones y recomendaciones	64
6.1. Conclusiones	64
6.2. Recomendaciones	66
A. Anexo: Planos mecánicos	68
B. Anexo: <i>Software</i> desarrollado	75
B.1. Código de Arduino para rotación motor de paso	75
B.2. Código de muestreo entre ESP32S y ADC-16bit	80
B.3. <i>Script</i> de visualizacion y captura de datos	85
B.3.1. Visualizacion.sh	85
B.3.2. openport.sh	85
B.3.3. rwfile.sh	86
B.3.4. plot.sh	86
B.4. Rutina en <i>Jupyter Notebook Python</i> para análisis de datos	86
B.5. Rutina en <i>Jupyter Notebook Python</i> para ajuste funcion <i>Sinc</i>	94
C. Anexo: Laboratorios para la educación	105
C.1. Laboratorio Señal del Sol _☉ con una antena paraboloide	105
C.2. Obtención del diámetro angular del Sol _☉ con el Radio Interferómetro IMFR11GHz	108
C.3. Construcción de una imagen 2D de una fuente extendida.	111
D. Anexo: Manuales (videos) de operación y mantenimiento	113
E. Multimedia	114
Bibliografía	116

Lista de Figuras

1-1. Transmitancia u opacidad del espectro electromagnético a través de la atmósfera. ESA/Hubble (F. Granato)	2
1-2. Fuentes de radiación en radio. Figura basada del trabajo de Flavio Falcinelli. RadioAstroLab.	3
2-1. Esquema conceptual del interferómetro.	5
2-2. Geometría del interferómetro, señal con caminos iguales.	6
2-3. Geometría del retraso de la señal.	7
2-4. Patrón teórico de interferencia de una fuente puntual.	13
2-5. Patrón de interferencia atenuado de una fuente extendida.	16
2-6. Función Sinc.	17
3-1. Plato paraboloides con foco <i>offset</i>	20
3-2. Ángulo de <i>Offset</i>	21
3-3. Variación de la Resolución angular con el <i>Baseline</i>	22
3-4. Sistemas constitutivos del Radio Interferómetro IMFR11GHz.	25
3-5. Diseño CAD de sistema de rotación en azimut.	26
3-6. Componentes del sistema de rotación en azimut. De izquierda a derecha: Transmisión y pier, Motor de paso, Ensamble, Sistema completo con freno.	27

3-7.	Diseño CAD de sistema de rotación en altura.	28
3-8.	Componentes del sistema de rotación en altura. Se observa el eje pivote, actuador lineal de tornillo y Ensamble.	28
3-9.	Diseño CAD de sistema interferométrico.	29
3-10.	Componentes del sistema interferométrico. Se observa el grupo de espejos, Base-line y Reflector parabólico con LNBF.	30
3-11.	Buscador Solar y Goniómetro análogo.	31
3-12.	Esquema eléctrico del tablero de potencia.	32
3-13.	Tablero de potencia de motores, caja de distribución y Joystick.	33
3-14.	Diagrama eléctrico del gabinete de recepción de la señal.	34
3-15.	Componentes del gabinete de recepción de la señal. Se observan los componentes conectados.	35
3-16.	Detalle del panel frontal del gabinete y del microprocesador ESP 32S y el ADC-16bit.	35
3-17.	Localización del Radio Interferómetro IMFR11GHz en el edificio del Observatorio Astronómico Nacional - OAN.	38
3-18.	Ensamble general del IMFR11GHz.	39
4-1.	Alistamiento de sesión de muestreo.	43
4-2.	Datos de un barrido del disco solar.	43
4-3.	Detalle: Datos de un barrido del disco solar.	44
4-4.	IMFR11GHz: Patrón de interferencia a B940.	45
4-5.	IMFR11GHz: Patrón de interferencia a B1100.	45
4-6.	IMFR11GHz: Patrón de interferencia a B1200.	45
4-7.	IMFR11GHz: Patrón de interferencia a B1300.	46
4-8.	IMFR11GHz: Patrón de interferencia a B1400.	46

4-9. IMFR11GHz: Patrón de interferencia a B1500.	46
4-10. IMFR11GHz: Patrón de interferencia a B1600.	47
4-11. IMFR11GHz: Patrón de interferencia a B1700.	47
4-12. IMFR11GHz: Patrón de interferencia a B1800.	47
4-13. IMFR11GHz: Patrón de interferencia a B1900.	48
4-14. IMFR11GHz: Patrón de interferencia a B2000.	48
4-15. IMFR11GHz: Patrón de interferencia a B2100.	48
4-16. IMFR11GHz: Patrón de interferencia a B2200.	49
4-17. IMFR11GHz: Patrón de interferencia a B2300.	49
4-18. IMFR11GHz: Patrón de interferencia a B2400.	49
4-19. IMFR11GHz: Patrón de interferencia a B2500.	50
4-20. IMFR11GHz: Patrón de interferencia a B2600.	50
4-21. IMFR11GHz: Patrón de interferencia a B2700.	50
4-22. IMFR11GHz: Patrón de interferencia a B2800.	51
4-23. IMFR11GHz: Patrón de interferencia a B2900.	51
4-24. IMFR11GHz: Patrón de interferencia a B3000.	51
4-25. IMFR11GHz: Amplitud de la Visibilidad.	54
5-1. IMFR11GHz: Datos de visibilidad de varias sesiones.	56
5-2. IMFR11GHz: Ajuste función sinc a los datos de amplitud de la visibilidad.	57
5-3. IMFR11GHz: Función sinc ajustada y determinación primer cero de la función.	58
5-4. IMFR11GHz: Función sinc ajustada y Límites de ajuste según los parametros de la función y sus errores respectivos.	58
5-5. Dependencia de la relación r durante el mínimo solar en 1985-1986 a longitudes de onda λ de 10.7 cm y 3 cm. Das, Sakar y Sen 2000.	59

5-6. IMFR11GHz: Barrido en altura a diferentes azimut.	61
5-7. IMFR11GHz: Imagen 2D Sol _☉ a 11GHz.	62
C-1. Elementos y conexión a SDR.	106
C-2. Recepción de señal o intensidad Solar.	107
C-3. Sesión típica para el Interferómetro IMFR11GHz.	109

Lista de Tablas

3-1. Parámetros del Radio Interferómetro IMFR11GHz.	23
4-1. Visibilidad para cada B_λ	53

1. Introducción

La radioastronomía como herramienta de formación académica en las universidades y en los colegios posee una importancia sin igual, ya que posibilita el entendimiento y la apropiación de conceptos físicos, matemáticos, astronómicos y de ingeniería. Adicionalmente en Colombia, debido a que la cantidad de noches con nubes [1, Pinzón, G.] [2, Chaparro, G.] es cercana al 60 %, la educación de la astronomía con el uso de telescopios ópticos presenta la dificultad de mantener una continuidad y acceso en el momento que se desea. En particular éste último inconveniente puede ser solventado con el uso de un radiotelescopio, ya que estos permiten explorar la bóveda celeste tanto de día como de noche y en general, para la mayoría de las radio ondas las nubes son transparentes, lo cual permite la exploración del cielo, como se observa en la Figura 1-1.

El origen de este proyecto surge de las actividades de divulgación dentro del Observatorio Astronómico Nacional y en el marco de los seminarios de investigación, en donde se propuso el apropiamiento y desarrollo de un radio interferómetro a nivel educacional con la capacidad de resolver una fuente extendida como el Sol_o basado en el radio instrumento desarrollado en la universidad de Stony Brook en New York.[3, Koda, J]

La metodología con la cual se abordó este proyecto consistió en realizar inicialmente un revisión de artículos enfocados a la radioastronomía e interferometría, posteriormente en describir la física de la interferencia de la señal y el ajuste de los datos; y en realizar un diseño propio del radio interferómetro, que abarcara tanto los sistemas mecánicos, como electrónicos y de manejo de los datos.

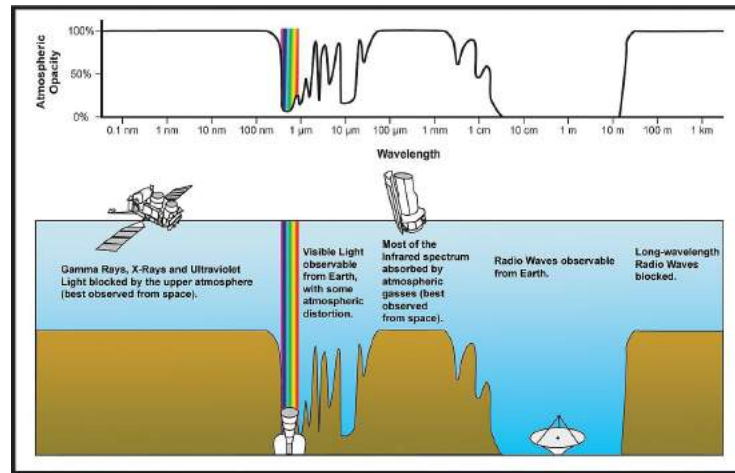


Figura 1-1.: Transmitancia u opacidad del espectro electromagnético a través de la atmósfera.
ESA/Hubble (F. Granato)

Por ultimo se construyó e instaló el instrumento para así poder realizar pruebas y toma de datos del Sol_{\odot} .

Además del Sol_{\odot} existen otras fuentes de radiación a esta frecuencia como la nebulosa Taurus A (M1) o nebulosa del Cangrejo, la nebulosa remanente de Cassiopea A, la nebulosa Orión A (M42) entre otras, que son de interés científico y pueden ser exploradas y analizadas con este instrumento. Con nuevos desarrollos de automatización y seguimiento del cielo se logrará obtener datos de clima solar, fulguraciones solares, etc. En la figura 1-2 se pueden observar diferentes fuentes que emiten en ondas de radio, la frecuencia en el eje horizontal y su correspondencia en longitud de onda y en el eje vertical la intensidad de flujo en Janskys ($1\text{Jy} = 10^{-26} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{Hz}}$); se trazó un línea punteada vertical en la frecuencia de operación del radio interferómetro y se identifican las principales fuentes de emisión que podrían ser detectadas a una frecuencia de 11GHz o una longitud de onda de 2.7 cm.

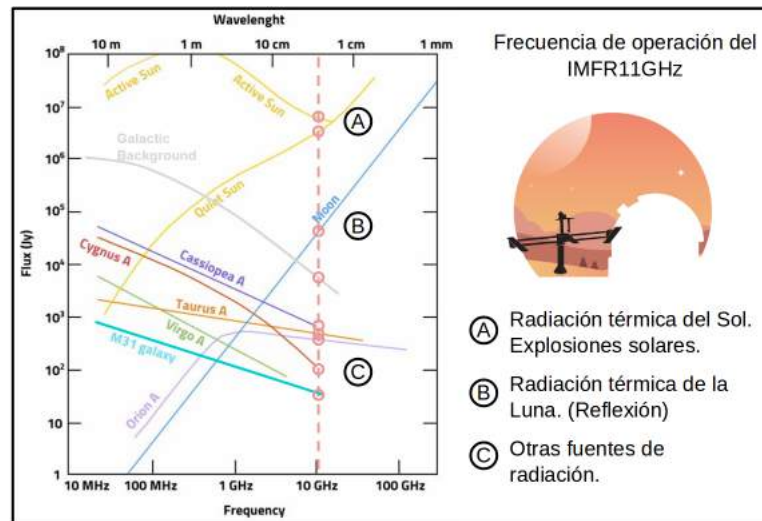



Figura 1-2.: Fuentes de radiación en radio. Figura basada del trabajo de Flavio Falcinelli. Radio-AstroLab.

El desarrollo del radio interferómetro IMFR11GHz, se basa en el principio de interferencia de ondas, similar en su concepto al desarrollado por Michelson & Pease en los comienzos del siglo XX, donde el principio fundamental es dividir el haz proveniente de una fuente única y transmitirla por caminos diferentes en el dispositivo, para luego reunirlos e interferirlos en el plano donde el detector esta localizado. El alcance del proyecto esta enfocado en la apropiación, para la comunidad educativa, de la tecnología e instrumentación astronómica en interferometría, tanto en *hardware* como en *software*, ya que su desarrollo esta basado en filosofía *Open source & Open hardware*. El instrumento se construyó e instaló en el Observatorio Astronómico Nacional (OAN) donde se logró la parametrización del radio telescopio para la medición de fuentes extendidas como el Sol_☉. Como ayuda visual durante la lectura de este documento, que posibilita aclarar temas, solucionar dudas o generar nuevas ideas, se han referenciado vídeos explicativos del tema que se esta tratando en algunas secciones o párrafos y se indican con el siguiente icono  y con cita a pie de página para que pueda ser consultado en el canal de YouTube del proyecto.

2. Descripción física de la interferometría

Las bases matemáticas del fenómeno de interferencia aditiva de señales provenientes de una sola fuente, se pueden encontrar en el trabajo realizado por Michelson & Pease en 1921 [4, Michelson] y enunciadas por Jin Koda[3, Koda, J] en el 2017. Para iniciar con el análisis del retraso de la señal y su potencia total, medidas que se logran con el interferómetro, es necesario conocer su configuración mecánica y óptica, en la siguiente sección se ilustra el esquema conceptual del radio interferómetro.

2.1. Esquema del instrumento

La figura **2-1**, ilustra y numera el esquema conceptual del sistema interferométrico que contiene los siguientes componentes:

1. Base de rotación Azimutal.
2. Base de rotación en Inclinación.
3. Guía de Línea Base (B).
4. Espejo Izquierdo (Punto 1).
5. Espejo Derecho (Punto 2).
6. Espejo tipo cuña a 45° .
7. Reflector parabólico.
8. Receptor o *LNBF*.

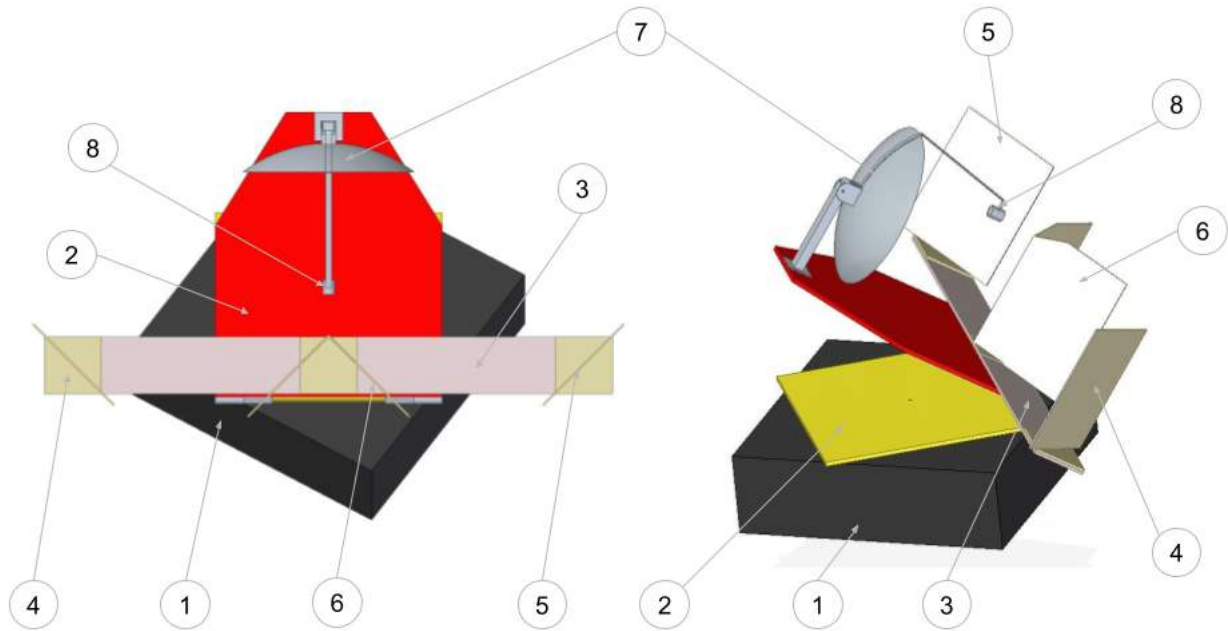


Figura 2-1.: Esquema conceptual del interferómetro.

Las bases de rotación en azimut y en altura apuntan el radio interferómetro, hacia la radio fuente sobre la bóveda celeste. Los espejos Izquierdo y Derecho se desplazan a lo largo de la Guía de Línea Base para modificar la distancia entre ellos (*Baseline*); el espejo en forma de cuña redirige la señal de los espejos laterales izquierdo (4) y derecho (5) al reflector parabólico, el cual enfoca las señales hacia el foco. Es en este punto donde las señales se interfieren. Esta señal unificada es transferida al sistema de manejo de la señal, el cual se describirá en la sección 3.2.

2.2. Retraso Geométrico

Asumiendo que una sola fuente es responsable por la emisión, y que el frente de onda incidente es plano, se produce un retraso de una de las señales. Este retraso se debe a la configuración del interferómetro, su geometría y la separación entre el espejo lateral izquierdo (Posición 1) y el espejo lateral derecho (Posición 2) que se conoce como "*Baseline*" (B).

Estas dos señales (Color verde) en los puntos 1 y 2, se reflejan hacia el espejo en forma de cuña y de éste al reflector parabólico que concentra y mezcla las dos señales en la antena o LNBF *Low Block Noise Feedhorn*, ubicado en el foco. En la figura 2-2 se ilustra la geometría del sistema, en la cual el interferómetro está apuntando directamente a la fuente y los caminos que recorren las señales son iguales y por lo tanto no se ha configurado el retraso de la señal.

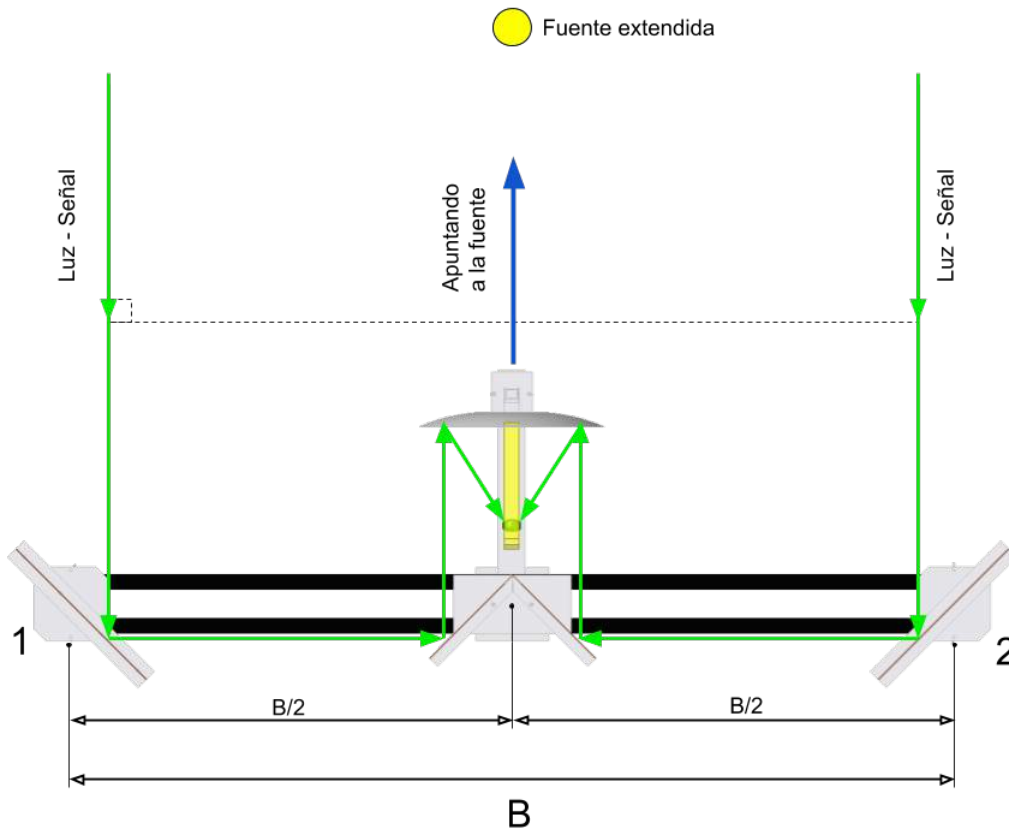


Figura 2-2.: Geometría del interferómetro, señal con caminos iguales.

En la figura 2-3, la señal se recibe mientras se realiza un barrido en azimut del interferómetro, se ha rotado en azimut un ángulo ψ , produciendo una diferencia de caminos entre las señales, configurando así el retraso τ (ver ecuación 2-5). Este ángulo ψ se produce por la diferencia en el ángulo al cual se encuentra la fuente θ_0 y el ángulo de apuntamiento del interferómetro θ . En las ecuaciones 2-1 y 2-2 se describe el retraso geométrico. El ángulo ψ se relaciona con el *Baseline*

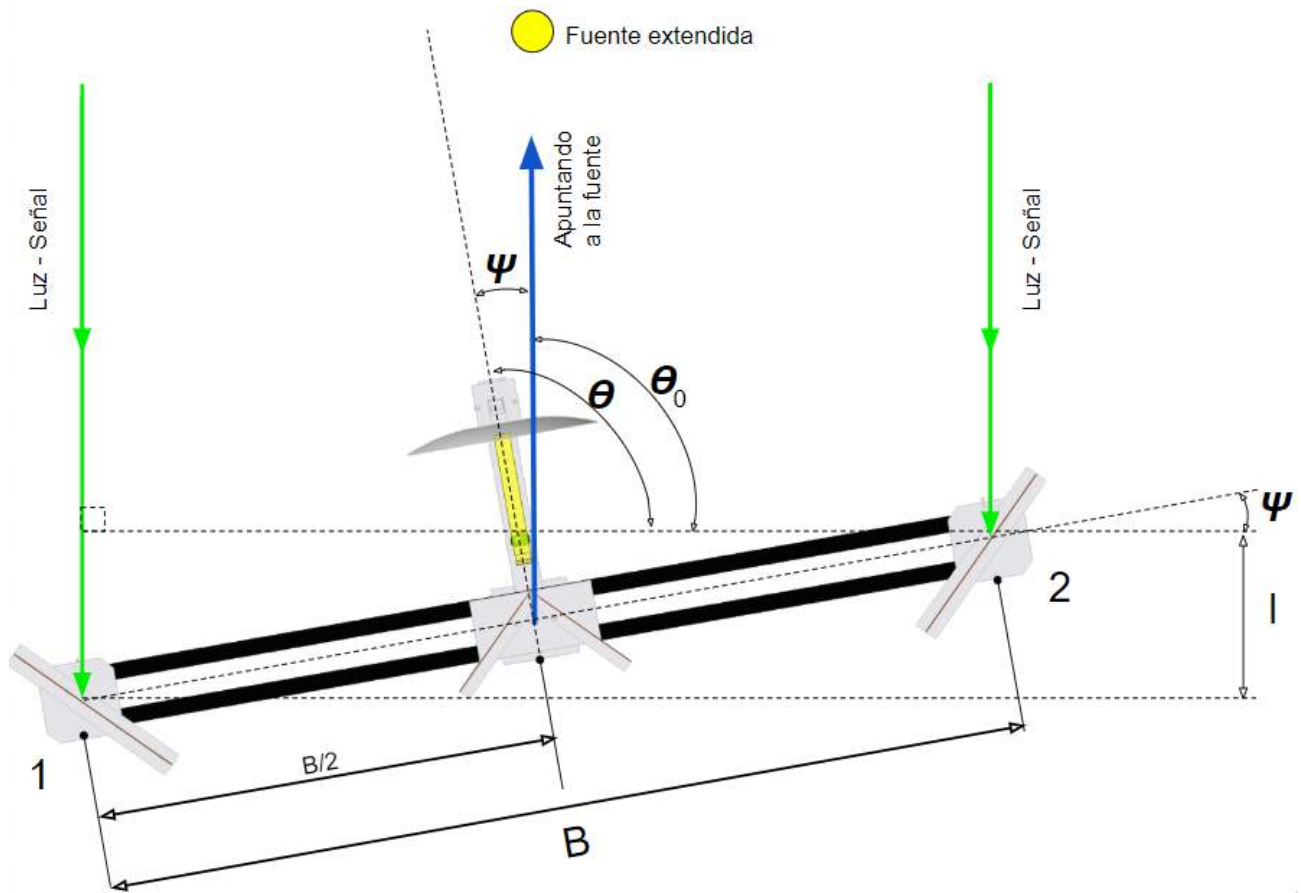


Figura 2-3.: Geometría del retraso de la señal.

(B) y con la distancia adicional que debe recorrer el fotón, $l = c \cdot \tau$, donde c es la velocidad de la luz, por medio de:

$$\psi = (\theta - \theta_0), \quad (2-1)$$

$$\sin(\psi) = \frac{l}{B}, \quad (2-2)$$

$$B \cdot \sin(\theta - \theta_0) = l, \quad (2-3)$$

como $l = c \cdot \tau$ entonces,

$$B \cdot \sin(\theta - \theta_0) = c \cdot \tau, \quad (2-4)$$

de lo anterior,

$$\tau = \frac{B \cdot \sin(\theta - \theta_0)}{c}, \quad (2-5)$$

debido a que la mayoría de los objetos astronómicos tienen un pequeño tamaño angular, se puede aproximar el seno de la diferencia de los dos ángulos a la diferencia de los ángulos. Por lo tanto

$$\tau \approx \frac{B \cdot (\theta - \theta_0)}{c}. \quad (2-6)$$

Con la configuración del sistema interferométrico planteado se tiene que el orden de magnitud de τ esta en los nanosegundos.

2.3. Potencia total

Las señales de radio son radiación electromagnética y pueden ser descritas en términos del campo eléctrico \vec{E} y un campo magnético \vec{B} . Por simplificación, se considerará solo el campo eléctrico \vec{E} en los siguientes cálculos, sin perder la generalidad del análisis. Una onda electromagnética puede ser descrita por medio de la ecuación 2-7, una función sinusoidal, plana, polarizada, propagándose en dirección z y en función de la distancia y el tiempo t , como lo describe P. Hariharan [5, Hariharan, P], como:

$$\vec{E}_1(t) = a \cdot \cos[2\pi\nu(t - \frac{z}{c})], \quad (2-7)$$

donde a es la amplitud, ν la frecuencia y c la velocidad de propagación de la onda. También se puede escribir en exponencial compleja de la siguiente forma:

$$\vec{E}_1(t) = \text{Re}\{ae^{[i2\pi\nu(t - \frac{z}{c})]}\}, \quad (2-8)$$

donde $\text{Re}\{\}$ representa la parte real de la onda electromagnética, junto con $i = (-1)^{1/2}$. La ecuación anterior se puede expresar en factores como el producto de su variación espacial y temporal así:

$$\vec{E}_1(t) = \text{Re}\{ae^{(-i2\pi\nu\frac{z}{c})}e^{(i2\pi\nu t)}\}, \quad (2-9)$$

2.3 Potencia total

ahora, se define que ϕ es la diferencia de fase, así:

$$\phi = 2\pi\nu\frac{z}{v}, \quad (2-10)$$

por lo tanto se obtiene que la ecuación 2-9 es:

$$\vec{E}_1(t) = \text{Re}\{ae^{(-i\phi)}e^{(i2\pi\nu t)}\}, \quad (2-11)$$

asumiendo que todas las operaciones en $\vec{E}_1(t)$ son lineales, es mas simple usa la función compleja:

$$\vec{E}_1(t) = ae^{(-i\phi)}e^{(i2\pi\nu t)}, \quad (2-12)$$

y tomando la parte real de la ecuación 2-12, se puede escribir que:

$$\vec{E}_1(t) = Ae^{(i2\pi\nu t)}, \quad (2-13)$$

donde,

$$A = ae^{(-i\phi)}, \quad (2-14)$$

es conocido como la amplitud compleja de la oscilación y $A \in \mathbb{C}$, por lo tanto,

$$|A|^2 = A\bar{A}, \quad (2-15)$$

$$|A|^2 = ae^{-i\phi}ae^{i\phi}, \quad (2-16)$$

$$|A|^2 = a^2, \quad (2-17)$$

$$|A|^2 = a^2 = I, \quad (2-18)$$

ahora, bien, en el caso de interferómetro, según la figura **2-3**, se tienen dos ondas planas propagándose y siendo reflejadas hasta el reflector parabólico en donde son superpuestas en el *LNBF*, en donde el campo eléctrico total en este punto es:

$$\vec{E}_{\text{total}} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2, \quad (2-19)$$

si tanto \vec{E}_1 y \vec{E}_2 tienen la misma frecuencia, la intensidad total en este punto es:

$$I_{\text{total}} = |A_1 + A_2|^2, \quad (2-20)$$

donde, $A_1 = a_1 e^{(-i\phi_1)}$ y $A_2 = a_2 e^{(-i\phi_2)}$ son la amplitud compleja de la dos ondas, entonces:

$$I_{\text{total}} = A_1^2 + A_2^2 + A_1 A_2^* + A_1^* A_2, \quad (2-21)$$

ahora, según la ecuación 2-18, y de las definiciones de A_1 y A_2 se obtiene:

$$I_{\text{total}} = I_1 + I_2 + a_1 e^{i\phi_1} a_2 e^{-i\phi_2} + a_2 e^{i\phi_2} a_1 e^{-i\phi_1}, \quad (2-22)$$

factorizando,

$$P_{\text{total}} = I_1 + I_2 + a_1 a_2 \left[e^{i\phi_1} e^{-i\phi_2} + e^{i\phi_2} e^{-i\phi_1} \right], \quad (2-23)$$

ahora, se define que el retraso de fase es,

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1, \quad (2-24)$$

entonces, se tiene que:

$$I_{\text{total}} = I_1 + I_2 + a_1 a_2 \left[e^{i\Delta\phi} + e^{-i\Delta\phi} \right], \quad (2-25)$$

$$I_{\text{total}} = I_1 + I_2 + a_1 a_2 \left[2\cos(\Delta\phi) \right], \quad (2-26)$$

De la ecuación 2-18, se tiene que:

$$I_{\text{total}} = I_1 + I_2 + |A_1| |A_2| \left[2\cos(\Delta\phi) \right], \quad (2-27)$$

$$I_{\text{total}} = I_1 + I_2 + I_1^{1/2} I_2^{1/2} \left[2\cos(\Delta\phi) \right] \quad (2-28)$$

Sabiendo que es un frente de onda el que se refleja en los espejos de las posiciones 1 y 2, se tiene que $I_1 = I_2 = P_0$, entonces:

$$I_{\text{total}} = I_0 + I_0 + 2I_0(\cos(\Delta\phi)), \quad (2-29)$$

2.3 Potencia total

siendo entonces la intensidad total de la interferencia de la señal,

$$I_{\text{total}} = 2I_0[1 + (\cos(\Delta\phi))]. \quad (2-30)$$

Con este resultado de la intensidad total y teniendo en cuenta que la diferencia de fase, corresponde al retraso total τ , y sabiendo que $z = c \cdot \tau$, se puede escribir la potencia en función del *Baseline* según la ecuación 2-6, así:

$$\phi_1 = \frac{2\pi\nu z_1}{v} = \frac{2\pi\nu c \tau_1}{v}, \quad (2-31)$$

$$\phi_2 = \frac{2\pi\nu z_2}{v} = \frac{2\pi\nu c \tau_2}{v}, \quad (2-32)$$

Por lo tanto,

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = \frac{2\pi\nu c}{v}(\Delta\tau), \quad (2-33)$$

$$P(\theta) = E^2(\theta_0) \left[1 + \cos\left(2\pi\nu \frac{B(\theta - \theta_0)}{c}\right) \right], \quad (2-34)$$

ahora, se puede definir B_λ como una *Baseline* normalizada de la siguiente forma:

$$B_\lambda \equiv \frac{B}{\lambda}, \quad (2-35)$$

y

$$\lambda = \frac{c}{\nu}, \quad (2-36)$$

reemplazando las dos ecuaciones anteriores tenemos que la potencia total con una *Baseline* normalizada es:

$$P(\theta) = E^2(\theta_0) [1 + \cos(2\pi B_\lambda(\theta - \theta_0))], \quad (2-37)$$

esta ecuación puede ser generalizada para una fuente extendida de la siguiente forma:

$$P(\theta) = \int \epsilon(\theta_0) d\theta_0 [1 + \cos(2\pi B_\lambda(\theta - \theta_0))]. \quad (2-38)$$

En donde $\varepsilon(\theta_0)$ es distribución de la densidad de energía del objeto. Por lo tanto el interferómetro suma las señales, y mide la potencia en función del azimut $P(\theta)$ cuando se realiza un movimiento de barrido a través del disco solar y se obtienen patrones de interferencia debido a las variaciones de potencia en función del ángulo θ .

2.3.1. Fuente puntual

La distribución de densidad de energía de una fuente puntual es una función δ en la posición del objeto $\theta_0 = \theta_{\text{fuente}}$, si se define el marco de referencia, el origen del sistema de coordenadas para hacer que $\theta_{\text{fuente}} = 0$, se tiene que:

$$\varepsilon(\theta_0) = \varepsilon_0 \delta(\theta_0), \quad (2-39)$$

ahora, reemplazando en la ecuación 2-38, se tiene que la potencia para una fuente puntual, que al barrer el interferómetro se obtendrá una respuesta sinusoidal en función del ángulo θ (Figura 2-4) así:

$$P(\theta) = \varepsilon_0 [1 + \cos(2\pi B_\lambda (\theta - \theta_0))]. \quad (2-40)$$

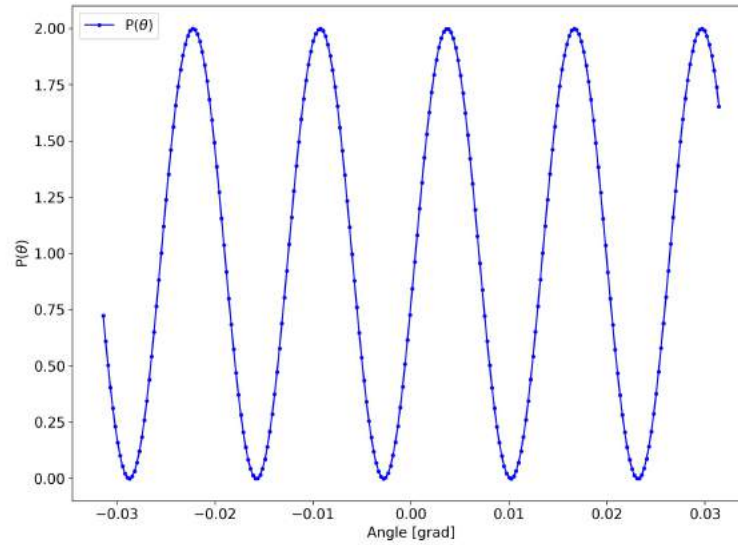


Figura 2-4.: Patrón teórico de interferencia de una fuente puntual.

2.4. Fuente extendida y visibilidad

Con el radio interferómetro IMFR11GHz, se obtiene el diámetro angular del Sol_{\odot} , para esto el interferómetro mide la transformada de Fourier de distribución de densidad de energía $\epsilon(\theta_0)$ de una fuente extendida, como el Sol_{\odot} . Usando la ecuación 2-38, se define la visibilidad, de la siguiente forma:

$$P(\theta) = \int \epsilon(\theta_0) d\theta_0 + \int \epsilon(\theta_0) \cos(2\pi B_{\lambda}(\theta - \theta_0)) d\theta_0, \quad (2-41)$$

si la función fuente, S_0 esta definida de la siguiente forma:

$$S_0 \equiv \int \epsilon(\theta_0) d\theta_0, \quad (2-42)$$

así se puede definir la visibilidad $V_o(B_{\lambda})$, como:

$$V(\theta, B_{\lambda}) \equiv \frac{1}{S_0} \int \epsilon(\theta_0) \cos[2\pi B_{\lambda}(\theta - \theta_0)] d\theta_0, \quad (2-43)$$

reemplazando en 2-41 se obtiene la potencia como función lineal de la visibilidad

$$P(\theta) \equiv S_o [1 + V(\theta, B_\lambda)], \quad (2-44)$$

ahora bien, siguiendo con la ecuación 2-43, se tiene que:

$$V(\theta, B_\lambda) \equiv \frac{1}{S_0} \int \epsilon(\theta_0) \cos[2\pi B_\lambda (\theta - \theta_0)] d\theta_0,$$

desarrollando el paréntesis cuadrado del *coseno*

$$V(\theta, B_\lambda) \equiv \frac{1}{S_0} \left[\int \epsilon(\theta_0) \left(\cos(2\pi B_\lambda \theta) \cos(2\pi B_\lambda \theta_0) + \sin(2\pi B_\lambda \theta) \sin(2\pi B_\lambda \theta_0) \right) d\theta_0 \right], \quad (2-45)$$

separando los términos en dos integrales,

$$V(\theta, B_\lambda) \equiv \frac{1}{S_0} \left[\int \epsilon(\theta_0) \left(\cos(2\pi B_\lambda \theta) \cos(2\pi B_\lambda \theta_0) \right) d\theta_0 + \int \epsilon(\theta_0) \left(\sin(2\pi B_\lambda \theta) \sin(2\pi B_\lambda \theta_0) \right) d\theta_0 \right], \quad (2-46)$$

dejando dentro de las integrales los términos dependientes de θ_0

$$V(\theta, B_\lambda) \equiv \frac{1}{S_0} \left[\cos(2\pi B_\lambda \theta) \int \epsilon(\theta_0) \left(\cos(2\pi B_\lambda \theta_0) \right) d\theta_0 + \sin(2\pi B_\lambda \theta) \int \epsilon(\theta_0) \left(\sin(2\pi B_\lambda \theta_0) \right) d\theta_0 \right], \quad (2-47)$$

$$V(\theta, B_\lambda) \equiv \cos(2\pi B_\lambda \theta) \frac{1}{S_0} \int \epsilon(\theta_0) \left(\cos(2\pi B_\lambda \theta_0) \right) d\theta_0 + \sin(2\pi B_\lambda \theta) \frac{1}{S_0} \int \epsilon(\theta_0) \left(\sin(2\pi B_\lambda \theta_0) \right) d\theta_0, \quad (2-48)$$

dado que la visibilidad $V_0(B_\lambda)$ y el cambio de fase $\Delta\theta$ se definen como:

$$V(\theta, B_\lambda) \equiv V_0(B_\lambda) \cos[2\pi B_\lambda (\theta - \Delta\theta)], \quad (2-49)$$

Por lo tanto se puede entender como:

$$V_0(B_\lambda) \cos(2\pi B_\lambda \Delta\theta) = \frac{1}{S_0} \int \epsilon(\theta_0) \left(\cos(2\pi B_\lambda \theta_0) \right) d\theta_0, \quad (2-50)$$

$$V_0(B_\lambda)\sin(2\pi B_\lambda\Delta\theta) = \frac{1}{S_0} \int \epsilon(\theta_0) \left(\sin(2\pi B_\lambda\theta_0) \right) d\theta_0, \quad (2-51)$$

y por lo tanto la ecuación 2-48 se puede expresar con la forma de la relación de Euler $e^{ix} = \sin(x) + i\cos(x)$:

$$V_0(B_\lambda) = e^{i2\pi B_\lambda\Delta\theta} \frac{1}{S_0} \int \epsilon(\theta_0) e^{-i2\pi B_\lambda\theta_0} d\theta_0, \quad (2-52)$$

el término $e^{i2\pi B_\lambda\Delta\theta}$ es el cambio de fase $\Delta\theta$ de una visibilidad en campo complejo. Por lo tanto la amplitud de la visibilidad es:

$$\left| V_0(B_\lambda) \right| = \left| \frac{1}{S_0} \int \epsilon(\theta_0) e^{-i2\pi B_\lambda\theta_0} d\theta_0 \right|. \quad (2-53)$$

Esta visibilidad es un componente de Fourier del objeto extendido $\epsilon(\theta_0)$ a una *Baseline* de longitud normalizada de B_λ . El inverso $1/B_\lambda$ es el tamaño angular de la componente de Fourier en radianes, lo que permitirá calcular el diámetro angular del Sol \odot . Observaciones a un *Baseline* corta, pueden resolver estructuras de un tamaño angular grande, mientras que con *Baseline* amplias pueden detectar estructuras de pequeño tamaño angular.

2.5. Mediciones del objeto extendido

Partiendo de la ecuación de potencia 2-44 y de la amplitud de la visibilidad 2-49, se tiene que:

$$P(\theta) = S_0 \left[1 + V_0(B_\lambda) \cos \left[2\pi B_\lambda(\theta - \Delta\theta) \right] \right] \quad (2-54)$$

En la figura 2-5 se observa el patrón de interferencia, cuando se barre sobre una fuente extendida, como el Sol \odot , en azimut durante un tiempo corto, este patrón es atenuado por el patrón de respuesta de la antena, sin embargo se asume que es relativamente constante alrededor del pico del patrón de interferencia. El eje horizontal puede estar también en unidades de ángulo (azimut) si se dispone

de la instrumentación suficiente para registrar cada dato con la variación del ángulo. Sin embargo para calcular la visibilidad, según la ecuación 2-57 es no es necesario conocer esta variación en azimut.

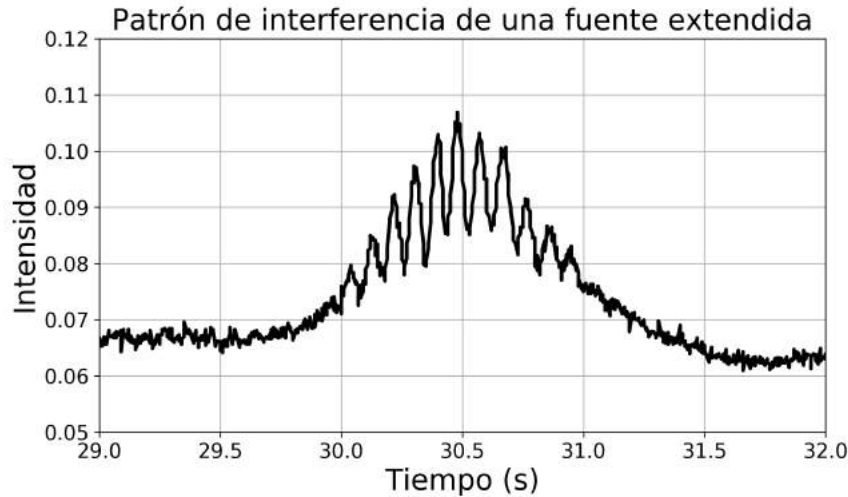


Figura 2-5.: Patrón de interferencia atenuado de una fuente extendida.

El máximo y el mínimo de la intensidad, potencia total, del patrón sinusoidal de interferencia son:

$$P_{\max} = S_0 \left[1 + V_o(B_\lambda) \right], \quad (2-55)$$

$$P_{\min} = S_0 \left[1 - V_o(B_\lambda) \right], \quad (2-56)$$

Con estos datos de potencia máxima y mínima se puede calcular la amplitud de visibilidad a un *Baseline* B_λ así:

$$\left| V_0(B_\lambda) \right| = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\max} + P_{\min}}. \quad (2-57)$$

Ahora, bien, realizando varias mediciones de la amplitud de la visibilidad $|V_0(B_\lambda)|$ cambiando el *Baseline*, es decir B_λ , se puede realizar una gráfica que muestra el cambio de la visibilidad a medida que cambia B_λ . Recordando que $|V_0(B_\lambda)|$ es la componente de Fourier de $\varepsilon(\theta_0)$, por lo tanto en

2.5 Mediciones del objeto extendido

la gráfica 2-6 de $|V_0(B_\lambda)|$ VS. B_λ se observa la transformada de Fourier de la distribución de la densidad de energía (emisión). La distribución de densidad de energía $\epsilon(\theta_0)$ del Sol_☉, puede ser aproximada a un función de paso rectangular, asumiendo que el diámetro angular del Sol_☉ es α de la siguiente forma:

$$\epsilon(\theta_0) = \begin{cases} 1, & \text{Sí, } |\theta_0| < \frac{\alpha}{2} \\ 0, & \text{Cualquier otra forma} \end{cases} \quad (2-58)$$

como se indica en la ecuación 2-53, la transformada de Fourier de la función pulso rectangular, es la visibilidad en función de B_λ que mide el interferómetro, y corresponde a la función *sinc*, definida así (figura 2-6):

$$|V_0(B_\lambda)| = \frac{\sin(\pi B_\lambda \alpha)}{\pi B_\lambda} \quad (2-59)$$

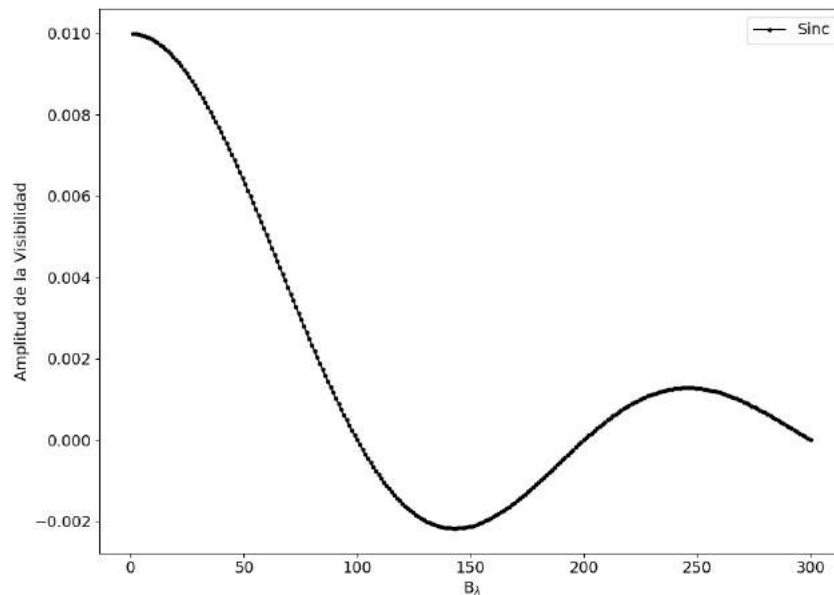


Figura 2-6.: Función Sinc.

Con los datos que se obtengan de las diferentes mediciones (Variando el *Baseline*) se podrá ajustar la función *sinc* obteniendo por lo tanto sus parámetros y encontrando el primer corte en el eje horizontal donde la función *sinc* es cero (punto *null*) que permite calcular el diámetro angular del Sol_☉ que se indica en la ecuación 2-59 como α .

Con esta descripción teórica de la interferencia de la señal proveniente de una fuente extendida se tienen las bases para realizar el tratamiento de los datos que se obtendrán en las sesiones de muestreo. Sin embargo es necesario también describir como se logra materializar estos conceptos físicos de retraso de la señal, potencia total y visibilidad en función del *baseline* por medio de un instrumento y sus diferentes sistemas; en el siguiente capítulo se aborda la solución técnica en instrumentación y *software* de radio interferómetro.

3. Radio Interferómetro IMFR11GHz

En este capítulo se describe el diseño, fabricación, e instalación del instrumento, tanto para su estructura mecánica, como para el sistema de manejo de la señal. También se describe el software de adquisición de datos y el posterior tratamiento de los mismos.

Los planos mecánicos, manuales de componentes, catálogos y los códigos fuente del software hacen parte de los anexos A, B y E.

El enfoque del diseño y construcción del radio interferómetro IMFR11GHz es de bajo costo y de fácil consecución, sin que esto afecte su funcionalidad y durabilidad. El desarrollo del software de control de movimiento en azimut y adquisición de datos es *Open source*, de tal forma que pueda ser replicado y mejorado por desarrollos futuros.

En las secciones siguientes se expone su parametrización como instrumento, su diseño mecánico para posibilitar los movimientos en azimut y en altura, su diseño eléctrico y de control y por ultimo el software de adquisición de datos,

3.1. Parámetros del radio interferómetro

Las características y parámetros más importantes del radio interferómetro, tienen que ver con su reflector parabólico y la configuración del retraso de la señal para un interferómetro del tipo *Michelson* y *Pease* [4, Michelson].

3.1.1. Características del reflector parabólico

En este proyecto se utilizó un reflector parabólico de uso comercial para comunicaciones satelitales, operando en un rango de frecuencia entre 11.45 GHz y 12.2 GHz. El sistema utiliza un LNBF *Low Noise Block Feedhorn* [6, J.M Polard], es un dispositivo de bajo ruido con bocina integrada, y es de bajo ruido (entre 0.1 dB a 1.0 dB). Este recibe la señal y la transforma a un señal de frecuencia manejo entre 950 MHz a 1.7 GHz que si es posible conducir por el cable coaxial.



Figura 3-1.: Plato paraboloides con foco *offset*.

La ganancia efectiva teórica de la antena se define como:

$$G = 10 \log_{10} \left[\epsilon \frac{4\pi A_f}{\lambda^2} \right], \quad (3-1)$$

donde A_f es el área efectiva, definida como:

$$A_f = \pi \frac{D_{min} D_{max}}{4}, \quad (3-2)$$

3.1 Parámetros del radio interferómetro

donde D_{\min} es el diámetro del reflector parabólico en el eje menor, 60 cm en este caso, y D_{\max} es el diámetro en el eje mayor, siendo 65 cm. Así su Area efectiva es $A_f = \pi \cdot 0,65 \cdot 0,6 \cdot 0,25 = 0,306$ m². Se tomó una eficiencia ϵ igual a 0.55, siendo un valor típico en este tipo de antenas. La longitud de onda de la señal es 2.7 cm. Reemplazando en la ecuación 3-1, se tiene:

$$G = 10 \log_{10} \left[0,55 \frac{4\pi(0,306)}{0,027^2} \right] = 34,55\text{dB} \quad (3-3)$$

El ángulo de incidencia de la señal es muy importante, de tal manera que dependiendo de la correcta orientación de la antena se logra iluminar correctamente el LNBF y por lo tanto obtener la máxima potencia de la señal recibida. Por medio del *software Parabola calculator 2.0* se calculó el ángulo de *offset* en 22.7°, como se observa en la figura 3-2

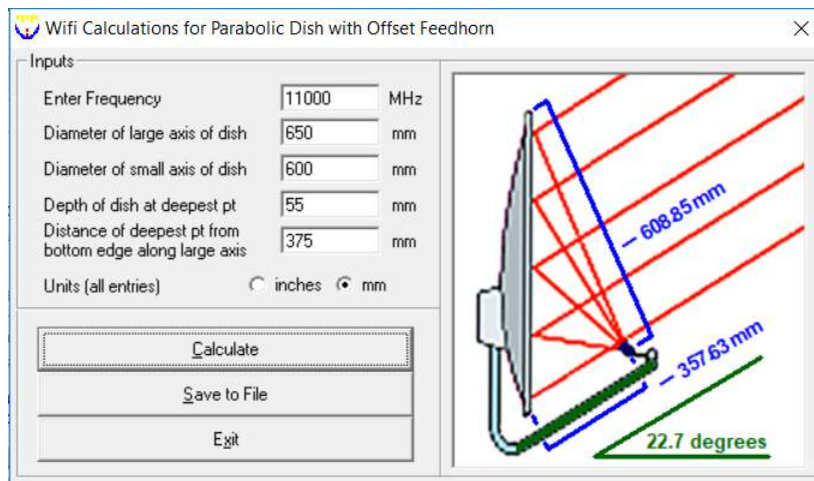


Figura 3-2.: Ángulo de *Offset*.

Este ángulo de *offset* hace parecer que la antena esta fuera de foco respecto a los espejos reflectores, sin embargo, en ese punto de inclinación se obtiene la máxima intensidad durante las sesiones de muestreo.

3.1.2. Resolución angular del interferómetro

La resolución angular del instrumento varia al modificar el *Baseline*, la distancia entre los espejos laterales de la figura 2-1, esta variación cambia la resolución angular del interferómetro según la siguiente formula:

$$R = \frac{\lambda}{B}. \quad (3-4)$$

Para obtener una resolución angular de 0.51° , el diámetro angular del Sol, así, sabiendo que una longitud de onda $\lambda = 2,7 \text{ cm}$, se tiene que el *Baseline* mínimo debe ser;

$$B = \frac{27,253 \text{ mm}}{\frac{0,51 \cdot 2\pi}{360} \text{ rad}} = 3061 \text{ mm}. \quad (3-5)$$

La figura 3-3 muestra la variación de la resolución (R) en función del *Baseline*.

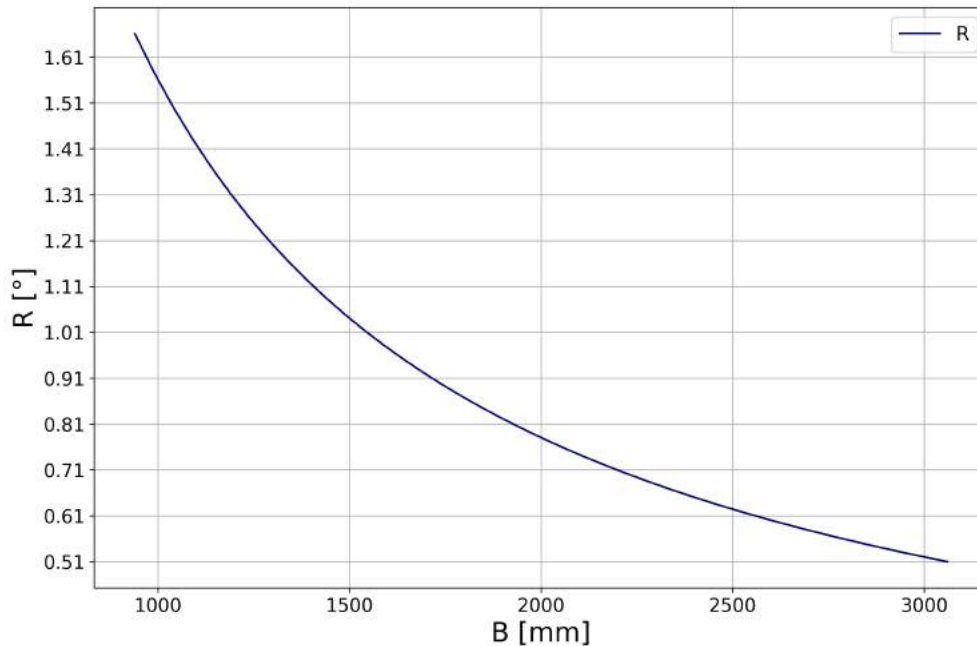


Figura 3-3.: Variación de la Resolución angular con el *Baseline*.

3.1.3. Parámetros del sistema interferométrico

En la siguiente tabla se listan los principales parámetros del sistema interferométrico:


Tabla 3-1.: Parámetros del Radio Interferómetro IMFR11GHz.

Parámetro	Valor
Frecuencia de Operación	$11.45 \times 10^9 - 12.2 \times 10^9$ Hz
Longitud de Onda	27.253 mm
<i>Baseline</i>	940 - 3060 mm
Resolución angular	$0.51^\circ - 1.67^\circ$
Variación en Azimuth	$0^\circ - 360^\circ$
Variación en Altura	$2^\circ - 90^\circ$
Eje mayor del reflector parabólico	650 mm
Eje menor del reflector parabólico	600 mm
Distancia entre el <i>Baseline</i> y el reflector parabólico	1000 mm
Profundidad del reflector parabólico	55 mm
Frecuencia de entrada del LNBF	$11.45 \times 10^9 - 12.2 \times 10^9$ Hz
Frecuencia de salida del LNBF	$0.95 \times 10^9 - 1.7 \times 10^9$ Hz
Polarización del LNBF	Circular
Ganancia del reflector parabólico	34.55 dB
Ángulo de <i>offset</i>	22.7°

3.2. Diseño mecánico, eléctrico y control

El diseño mecánico, eléctrico y control del interferómetro se basó en las siguientes directrices para facilitar su construcción y montaje:

- Materiales disponibles en el mercado nacional.
- Materiales estructurales de rechazo o de otros equipos.
- Sistema de rotación en azimut de segunda mano o de otra maquinaria.
- Componentes adquiridos de bajo, con resistencia a la intemperie.
- Fabricación nacional y de fácil manufactura (local).
- Acabados superficiales y pintura con resistencia a la intemperie (4 mils de espesor).
- Diseño ergonómico operable por dos humanos.
- Planos mecánicos y sistema de potencia con filosofía *OpenHardware*.
- *Software* y sistema de control con filosofía *OpenSource*.
- Inclusión de nuevas tecnologías de fabricación con impresión 3D.
- Bajo costo y repetitividad de construcción.
- Diseño con factibilidad de mejoras y automatización para seguimiento y control remoto.

El vídeo  muestra el modelo mecánico 3D, se puede consultar en el canal de Youtube del proyecto (IMFR11GHz, Modelo diseño mecánico, 2018)¹.

¹IMFR11GHz-Cap3-01-Modelo diseño mecánico, youtube vídeo

El radio interferómetro IMFR11GHz se diseñó basándose en el concepto de Jin Koda (2016) [1, J. Koda], y se acondicionó a las condiciones de latitud de Bogotá y al concepto de un instrumento para educación en radioastronomía e interferometría en condiciones externas (a la intemperie) en el Observatorio Astronómico Nacional.

Este instrumento está compuesto globalmente por cinco sistemas, como se ilustra en la figura 3-4, los cuales serán explicados con mayor detalle en las secciones siguientes.



Figura 3-4.: Sistemas constitutivos del Radio Interferómetro IMFR11GHz.

3.2.1. Sistema mecánico de rotación en azimut

El Sistema de rotación en azimut se fabricó utilizando un Pier en tubería de acero de segunda mano de redes de tubería a presión, se ensambló con soldadura eléctrica al sistema de rotación y este a una transmisión Piñón-Corona de un vehículo automotor chatarrizado y por último se acopló al piñón un motor de paso. Ver figura 3-5.

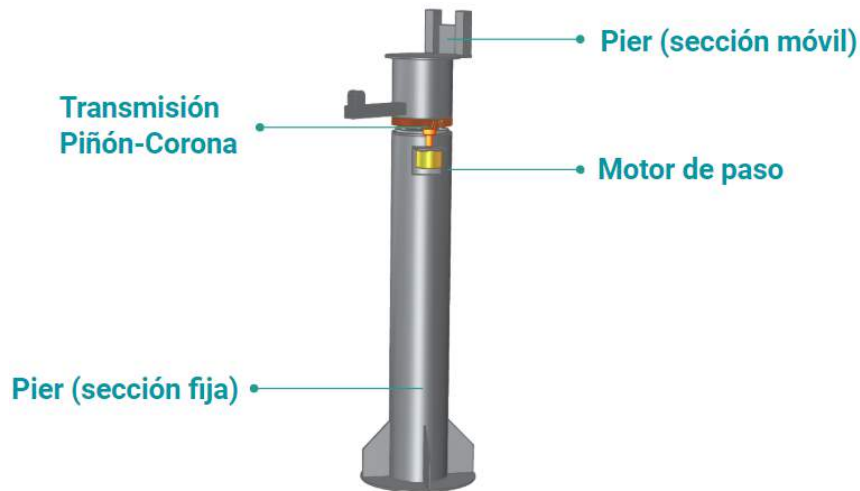



Figura 3-5.: Diseño CAD de sistema de rotación en azimut.

El sistema de rotación en azimut, posibilita la rotación controlada por medio de un *Joystick* en la dirección de las manecillas del reloj o contrario a esta. Puede girar desde 0 a 360 ° y para un desarrollo posterior, fuera del alcance de este proyecto, puede hacer seguimiento a un cuerpo celeste. También puede operar sin el uso del motor de paso en donde el movimiento se hace suavemente con la fuerza del operador. Posee un freno mecánico para mantener el interferómetro fijo cuando no está en uso. En la figura 3-8 se muestran los componentes principales del sistema en fabricación o ensamble. El vídeo  muestra el sistema de rotación en azimut, este se encuentra en el canal de Youtube del proyecto (IMFR11GHz, Sistema de rotación en azimut, 2018)²:

²IMFR11GHz-Cap3-02-Rotacion azimut, youtube vídeo



Figura 3-6.: Componentes del sistema de rotación en azimut.

De izquierda a derecha: Transmisión y pier, Motor de paso, Ensamble, Sistema completo con freno.

3.2.2. Sistema mecánico de rotación en elevación

El sistema mecánico de rotación de altura se diseñó para que permitiera cambiar la inclinación de todo el Sistema Interferométrico desde 0 hasta 90°, de tal forma que junto con el sistema de rotación en azimut se puede localizar a cualquier cuerpo celeste en cualquier momento del día o la noche. Utiliza un actuador lineal de tornillo que funciona a 12 Voltios DC. La parte inferior del actuador se apoya sobre la parte móvil del pier y la cabeza del vástago del actuador esta pinada en la placa base del Sistema Interferométrico. El vídeo [▶](#) muestra el diseño final del sistema de elevación en altura, se encuentra en el canal de Youtube del proyecto (IMFR11GHz, Sistema de rotación en altura, 2018)³. En la siguiente figura se observa el diseño CAD del sistema:

³IMFR11GHz-Cap3-03-Rotacion altura, youtube vídeo

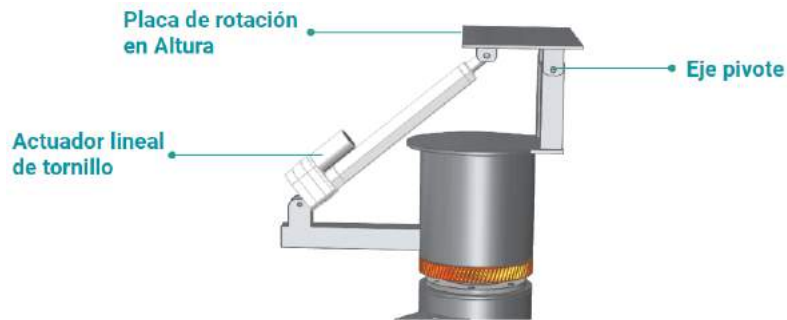


Figura 3-7.: Diseño CAD de sistema de rotación en altura.

Por medio de un *joystick* se cambia la polaridad del voltaje para que el tornillo interno del actuador gire en un sentido o en otro, permitiendo contraer o extender el vástago. Esta operación siempre debe ser ejecutada con el actuador ya que el Sistema Interferométrico pesa cerca de 70 kg. En la figura 3-8 se muestran los componentes principales del sistema de rotación en altura en fabricación o ensamble:



Figura 3-8.: Componentes del sistema de rotación en altura. Se observa el eje pivote, actuador lineal de tornillo y Ensamble.

3.2.3. Sistema interferométrico

Este sistema como su nombre lo indica posee todos los componentes para realizar la interferometría de la señal. En la figura 3-9 se observa el diseño CAD del sistema. Este posee dos espejos laterales

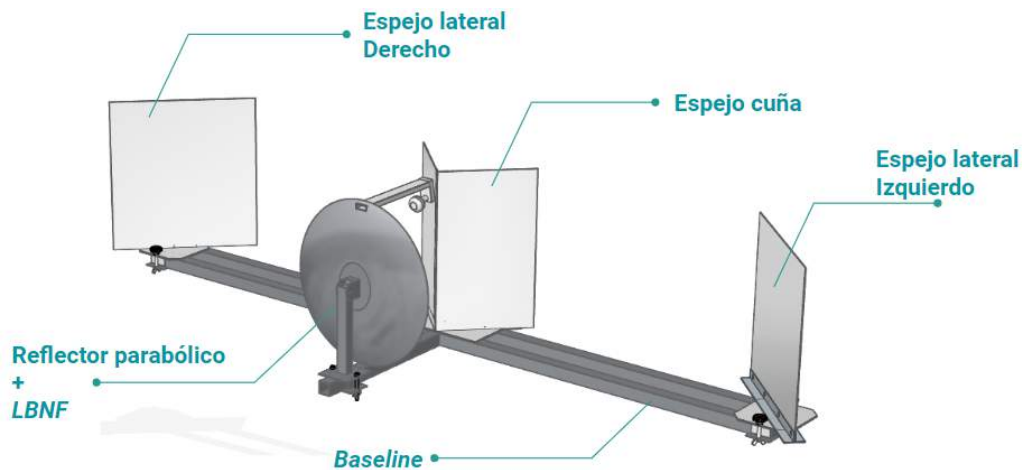



Figura 3-9.: Diseño CAD de sistema interferométrico.

y uno central en forma de cuña a 90° , fabricados en lámina de aluminio con acabado superficial 2B original del proceso de laminación dando una superficie lisa, reflectante y brillante con una rugosidad promedio entre 0.8 a $3.2 \mu\text{m}$. El espejo central tipo cuña puede desplazarse lateralmente para calibrar la porción del plato paraboloide reflejada del tal forma que permita balancear la intensidad proveniente de los espejos laterales. Los espejos laterales esta ensamblados cada uno en una base que los orienta a 45° respecto a línea de desplazamiento del *Baseline*; esta base se ajusta mediante tornillos para definir un distancia desde la línea central donde esta ubicado el plato paraboloide. Por medio de un láser para astronomía se alinearon los espejos y se garantizó que las reflexiones del haz cubrieran la totalidad del plato y reflejaran al *LBNF*. El vídeo  en el canal de Youtube del proyecto se puede observar el haz de láser reflejando en los espejos (IMFR11GHz, Alineación Laser, 2018)⁴. La guía *Baseline* posee una graduación en centímetros cada 50 mm para que fácilmente

⁴IMFR11GHz-Cap3-04-Alineacion laser espejos, youtube vídeo

se ubique el tamaño de *Baseline* que se utilizará en la sesión de medición. La longitud máxima de separación entre los dos espejos laterales sobre la guía *Baseline* es de 3060 mm; en el medio de la guía se extiende un brazo de soporte para el reflector parabólico. El reflector parabólico puede acercarse o alejarse del Espejo tipo cuña, además es posible inclinarlo para garantizar que el ángulo de *offset* esté entre 22 y 23°, y rotar con respecto a su eje si es necesario. La figura 3-10 muestra los componentes principales del sistema en fabricación o ensamble.



Figura 3-10.: Componentes del sistema interferométrico. Se observa el grupo de espejos, Baseline y Reflector parabólico con LNBF.

Para garantizar que se está apuntando el arreglo de espejos a la fuente extendida se fabricó en impresión 3D un buscador solar y se ubico bajo el reflector parabólico. El buscador solar es un instrumento que esta formado por dos planos paralelos, en uno de ellos se realiza un agujero pequeño (1 a 2 mm) en el centro de la superficie y en el otro plano se ubica gráficamente el centro del plano, al alinearse el Sol_☉ con el agujero, se proyecta un haz de luz sobre el plano opuesto; y al hacer coincidir el haz con el centro se logra alinear la fuente con el interferómetro. También se instaló un goniómetro análogo para verificar que la inclinación del Sistema Interferométrico coincida con

la altura del objeto celeste al cual se esta apuntando. El vídeo [▶](#) en el canal de Youtube del proyecto se puede ver el ensamble preliminar del arreglo interferométrico (IMFR11GHz, Timelapse ensamble sistema interferométrico, 2018)⁵. El LNBF esta fijo en el reflector parabólico y tiene una



Figura 3-11.: Buscador Solar y Goniómetro análogo.

conexión RF de la cual sale un cable coaxial blindado con impedancia de 75 dB directo al gabinete del Sistema de Manejo de señal.

3.2.4. Sistema eléctrico de potencia

Como uno de los objetivos de diseño del interferómetro es su operatividad se hizo necesario motorizar los movimientos de azimut y altura de tal forma que pudiese ser operado por dos personas, una operando el instrumento en el movimiento y búsqueda de la fuente extendida y otro capturando los datos en el computador portátil. En la figura 3-12 se muestra el esquema eléctrico del tablero de potencia.

Este sistema esta compuesto por un tablero de potencia que tiene un microprocesador Arduino Uno, que con su programación entrega las instrucciones de rotación al motor con cada impulso realizado

⁵IMFR11GHz-Cap3-05-Sistema interferométrico, youtube vídeo

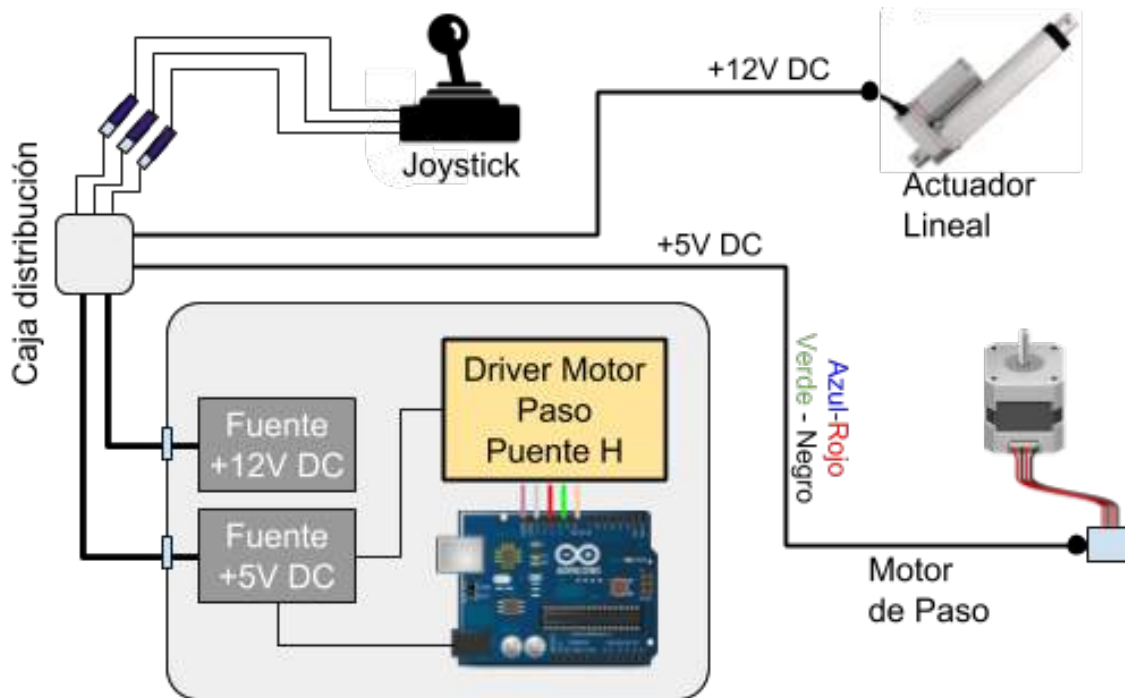


Figura 3-12.: Esquema eléctrico del tablero de potencia.

por el *joystick*. Estos comandos de rotación son recibidos por un *driver* o controlador del motor de paso, conocido en el mercado como Puente H, de fácil consecución. EL controlador envía de forma cableada la energía al motor ubicado en el pier de rotación en azimuth y su alimentación proviene de una fuente de corriente directa de 5 V DC y 2 A de potencia.

En cuanto al movimiento en altura, en el tablero, hay una segunda fuente de alimentación de 12V DC, que cada vez que el *joystick* se mueve hacia arriba o hacia abajo envía un pulso de contacto al motor interno del actuador lineal. La distribución del cableado desde el tablero de potencia hasta los elementos actuantes se realiza en una caja de distribución que se encuentra en el pier del interferómetro. En la figura 3-13 se observa el tablero de potencia con los componentes conectados y cableados.



Figura 3-13.: Tablero de potencia de motores, caja de distribución y Joystick.

3.2.5. Sistema electrónico de manejo de señal

En las sub-secciones anteriores se describió la totalidad del radio interferómetro, en lo concerniente a el *hardware*, sin embargo sin un tratamiento de la señal recibida no se pueden visualizar los patrones de interferencia y obtener finalmente el diámetro del Sol_{\odot} . El manejo de señal, que llega desde el LNBF por medio del cable coaxial blindado, se realiza con una etapa de amplificación y atenuación de la señal a 6dB, luego se filtra la señal en un ancho de banda entre 1.35 y 1.45

GHz para dejarla en las condiciones de manejo del detector análogo, tipo Diodo Schottky⁶, el cual entrega valores entre 0 y 0.2 voltios. Los datos son convertidos por ADC (por sus sigla en inglés "*Analog Digital Converter*") de 16 bit; el muestreo o *sampling* de los datos detectados son procesados por un microprocesador que los entrega como salida en un puerto microUSB para ser leídos en un computador portátil. La figura 3-14 muestra el diagrama eléctrico del gabinete de recepción de la señal. Para que todos los componentes funcionen correctamente el circuito debe estar aterrizado y

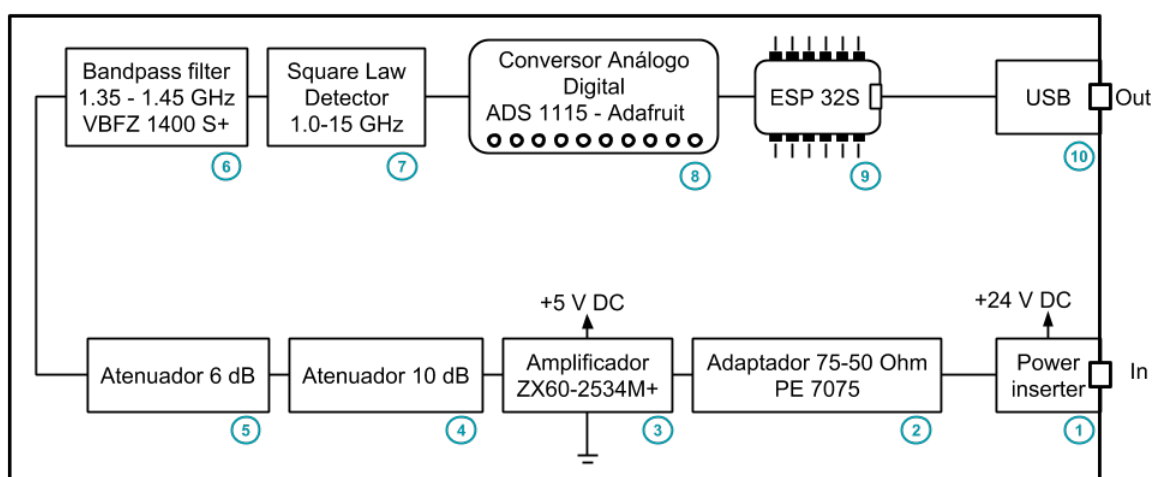


Figura 3-14.: Diagrama eléctrico del gabinete de recepción de la señal.

la alimentación de la señal debe estar a 24 V DC en el *power inserter* como se ilustra en la figura 3-14. El Amplificador también necesita de un voltaje de alimentación de 5V DC. El microprocesador se alimenta por medio del cable USB que se conecta al PC portátil, y este le entrega la energía al ADC. En un futuro desarrollo es posible, gracias a las características del microprocesador ESP32S, transmitir los datos vía WiFi, eliminando la conexión cableada USB y permitiendo tomarlos y leerlos remotamente en otro PC para visualización en tiempo real desde una portal web. Las figuras 3-15 y 3-16 muestran el gabinete electrónico con los componentes conectados.

⁶Datasheet SchottkyDetector 2086-6000-28

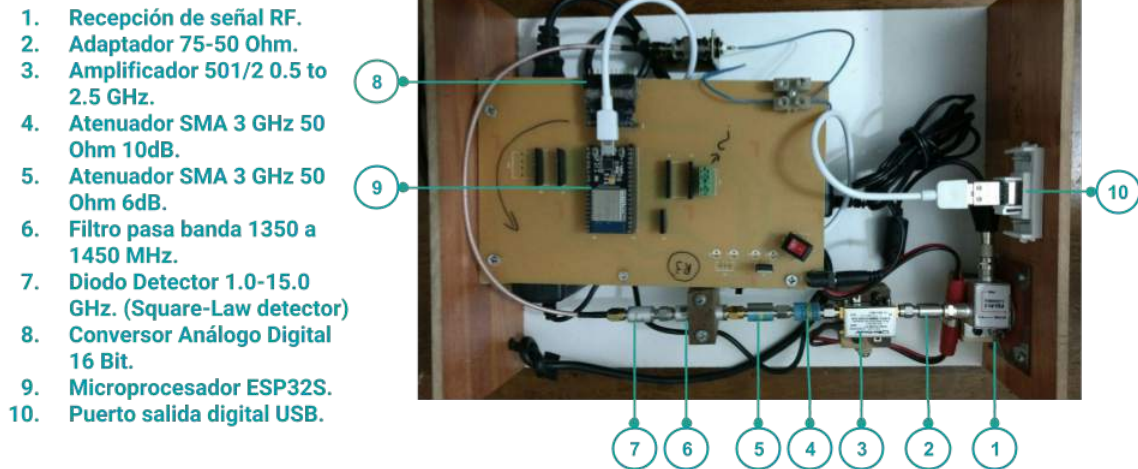


Figura 3-15.: Componentes del gabinete de recepción de la señal. Se observan los componentes conectados.

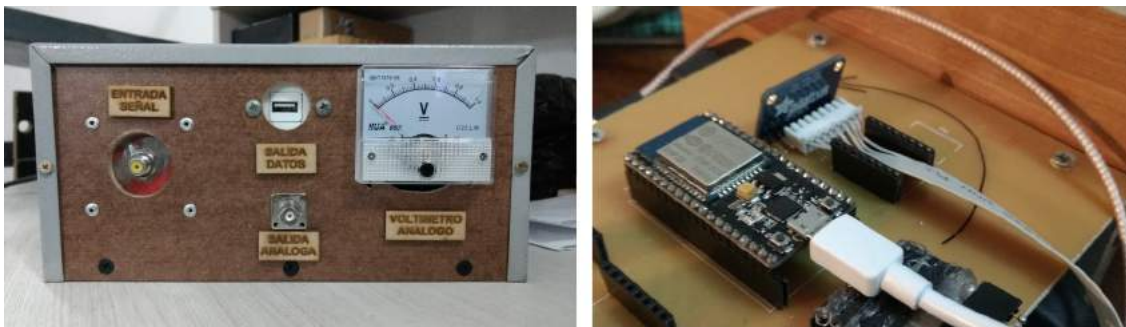


Figura 3-16.: Detalle del panel frontal del gabinete y del microprocesador ESP 32S y el ADC-16bit.

3.3. *Software* desarrollado

Durante el desarrollo de este proyecto fue necesario escribir códigos o rutinas para poder operar el instrumento, capturar datos y realizar análisis de las observaciones. La posibilidad de visualizar en tiempo real el comportamiento de la señal facilita el entendimiento del instrumento y además ofrece una experiencia más enriquecedora para el usuario, ya que evidencia el incremento de la

señal y los patrones de interferencia así este cubierto de nubes. Todos los códigos o rutinas desarrollados pueden ser consultados en el anexo B y también pueden ser utilizados descargándolos del repositorio del proyecto en internet en la plataforma Github (github.com/IMFR11GHz).

3.3.1. Rutina del motor de paso en azimut

La primera rutina desarrollada es la de control del motor de paso para la rotación en azimut, [Stepmotor01.ino](#), creada en la plataforma de programación Arduino. Con esta rutina se configura la velocidad de rotación en azimut del instrumento cuando se opera el *joystick*.

3.3.2. Código fuente de muestreo


El código de muestreo, [main.cpp](#), se desarrolló en C++, para ser implementado en el microprocesador ESP32S, con este código se parametriza el *sampling* del Conversor Análogo Digital a 250 SPS, también se especifica el puerto de salida y la velocidad de transmisión de los datos, así como el formato para ser leído por el puerto USB del computador Portátil.

3.3.3. *Script* de visualización y captura de datos

Después de haber sido procesados los datos y enviados a la salida USB del gabinete de manejo de señal, estos llegan al computador portátil. Este debe tener instalado una licencia de Linux o Ubuntu 14.04 en adelante y debe contar con el programa Gnuplot; en cuanto al *hardware*, desde un procesador tipo CoreI5 con al menos 5 Gb de memoria RAM es funcional para la recepción de los datos. En una terminal de Linux pueden ser leídos en un puerto lógico. Posteriormente son copiados en un archivo de trabajo y lectura en otra terminal, y por último en una tercera terminal para ser graficados en tiempo real en la herramienta Gnuplot. En la lista siguiente se encuentran los *script* de visualización en tiempo real y captura de los datos de cada sesión o practica. El tamaño

tipico de estos archivos es menor a 1 Mb, ya que los periodos de captura de datos son menores a 5 minutos.

- [Visualizacion.sh.](#)
- [openport.sh.](#)
- [rwfile.sh.](#)
- [plot.sh.](#)

Para comprender el proceso de captura y visualización en tiempo real de los datos en crudo de cada barrido que se ejecuta en una sesión o laboratorio se creo un vídeo de uso  de los *script* y se encuentra en el canal de Youtube del proyecto como (IMFR11GHz, Visualización y captura de datos, 2018)⁷.

3.3.4. Código de análisis de datos

Para el análisis de los datos se empleó *Jupyter Notebook*, con un *kernel* de *Python 2* en el cual se puede visualizar cada muestreo a cada *Baseline* leyendo el archivo generado por los *Scripts*. De esta forma se puede analizar la zona de interés, extraer el dato de máximos y mínimos del patrón de interferencia para utilizarlos en la ecuación de cálculo de la amplitud de la visibilidad 2-57 y tabular los datos de toda la sesión de laboratorio. La rutina en *Jupyter notebook* es [IMFR11GHz Plots fringes sesion.ipynb](#). Por último en la segunda rutina, [IMFR11GHz Sinc ajuste.ipynb](#), escrita en *Jupyter Notebook* se realiza el ajuste de los datos obtenidos de Visibilidad vs B_λ , y se ajusta la función *sinc* para conseguir el punto cero o "*null*" de la función y realizar la estimación del diámetro angular del Sol_\odot .

⁷IMFR11GHz-Cap3-06-Scripts captura datos, youtube vídeo

3.4. Instalación y Montaje del Radio Interferómetro

La instalación del radio interferómetro IMFR11GHz, se realizó en el Observatorio Astronómico Nacional, se busco el lugar mas apartado de contaminación de señales o reflexiones de emisiones de radio de la zona. El equipo esta empotrado a la placa del techo y su alimentación eléctrica se realiza a 110 Voltios AC, para el tablero de potencia. La figura 3-17 muestra el lugar de instalación del Radio interferómetro IMFR11GHz.

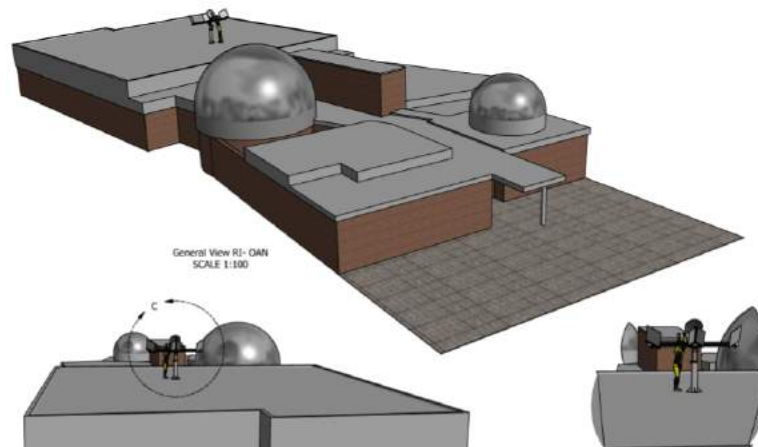



Figura 3-17.: Localización del Radio Interferómetro IMFR11GHz en el edificio del Observatorio Astronómico Nacional - OAN.

El ensamble total se puede observar en el vídeo  que se encuentra en el canal de Youtube del proyecto (IMFR11GHz, Timelapse ensamble radiotelescopio, 2018)⁸. La figura 3-18 muestra el ensamble del IMFR11GHz.

Su posición de guardado es con los espejos laterales recogidos a el mínimo *Baseline*, es decir 940 mm y bloqueado en azimut. El gabinete de manejo de señal se almacena en el interior del Obser-

⁸IMFR11GHz-Cap3-07-Timelapse ensamble radiotelescopio, youtube vídeo



Figura 3-18.: Ensamble general del IMFR11GHz.

vatorio Astronómico. Para realizar una sesión de toma de datos es necesario instalar una mesa de trabajo, ubicar el portátil y el gabinete de manejo de la señal y conectar el cable coaxial.

Ahora bien, con la descripción detallada en este capítulo de la totalidad del radio interferómetro, tanto en sus parámetros técnicos, como en su construcción mecánica, eléctrica, instrumentación, control, y *software*, es posible comprender su funcionamiento y la versatilidad para su operación, así como plantearse futuros retos en cuanto a su automatización para realizar monitoreo continuo de una fuente extendida.

Aunque es un equipo robusto y construido para permanecer a la intemperie, es necesario realizar rutinariamente mantenimiento preventivo de lubricación de sus partes móviles y limpieza y apriete de conectores eléctricos de potencia y control; en el anexo D se referencia dos manuales en vídeo para la Operación y Mantenimiento del instrumento.

En el siguiente capítulo se realiza la descripción de la rutina de inicio y calibración del instrumento, previo a mostrar la medición de la fuente extendida en diferentes *baseline* y la tabulación de los valores de visibilidad.

4. Medición de la fuente extendida

En este capítulo se desarrolla el proceso de puesta a punto y calibración meccánica del instrumento, también se muestran los datos obtenidos de una sesión de muestreo y el tratamiento de los mismos para obtener la curva de visibilidad.

4.1. Puesta a punto y calibración mecánica

La puesta a punto y calibración mecánica del radio interferómetro se hace necesaria solamente si se desensambló el reflector parabólico, o se modificó su ángulo de inclinación o se roto en su eje vertical, también si se desensambló el espejo en forma de cuña. Las siguientes actividades en su orden garantizan una correcta alineación y puesta a punto previo a realizar la rutina de observación.

1. Verificar el ángulo de inclinación del mástil del LNBF se encuentre entre 22 y 23° .
2. Verificar que los espejos laterales estén orientados a 45° respecto a la línea longitudinal de la guía *Baseline*.
3. Verificar que los espejos estén verticales respecto del plano de la guía *Baseline*.
4. Verificar que el eje menor del reflector parabólico este paralelo a la guía *Baseline*.
5. Verificar que el vértice (arista) del espejo tipo cuña este centrado o alineado al eje mayor del reflector parabólico.

6. Confirmar que los pasos 2 y 3 están correctos por medio de un láser haciendo reflejar su haz entre los espejos laterales en un movimiento horizontal desde un extremo al otro, de tal forma que se observe que el reflejo llega al espejo de cuña también de un extremo a otro.
7. Confirmar que los pasos 4 y 5 están correctos por medio de un láser haciendo reflejar su haz directamente en el espejo de cuña y observando que ilumina al reflector parabólico en todas su superficie. El movimiento debe ser vertical manteniendo al láser paralelo a la guía *Baseline*.


Con este procedimiento de calibración mecánica se asegura que el reflector quede totalmente iluminado con la señal de la fuente extendida.

4.2. Rutina de observación

Después de haber verificado que el sistema interferométrico esta calibrado, se puede proceder a realizar las observaciones, en la siguiente lista se enumeran los pasos para realizar una práctica típica de laboratorio para observar una fuente extendida como el Sol_{\odot} . La figura **4-1** muestra un sesión típica de observación.

1. Conectar eléctricamente a 110 V AC el tablero de potencia.
2. Conectar el *joystick* según las marquillas de sus conectores rápidos.
3. Conectar eléctricamente a 110 V AC el gabinete de manejo de señal.
4. Conectar el cable coaxial del LNBF a la entrada de señal del gabinete de manejo de señal.
5. Conectar el cable USB entre el computador portátil y el gabinete de manejo de señal (salida USB).

6. Iniciar el computador portátil.
7. Ubicar los espejos en el *Baseline* definido de muestreo.
8. Obtener la posición actual de la fuente extendida (Sol_{\odot}) con un software (i.e., *Stellarium*) o tabla de posición en azimut y altura.
9. Retirar el freno de rotación en azimut.
10. Apuntar en Altura y en Azimut, con el *joystick*, verificando con el Buscador Solar que se esta apuntando al Sol_{\odot} . Alejar en azimut unos 5° de la fuente extendida.
11. Iniciar la captura de datos con el *script* [Visualizacion.sh](#) y barrer el diámetro del sol en un lapso de tiempo corto (5 - 10 segundos), sobrepasar en azimut unos 5° de la fuente extendida.
12. Finalizar la captura de datos, cerrando los terminales de los *script* y guardar el archivo generado *radiosun.log* con la nomenclatura apropiada para sus posterior análisis.
13. Repetir los pasos 7 al 13 con el nuevo *Baseline* de muestreo.

El vídeo  (IMFR11GHz, Manual de Operación, 2018)¹ en el canal de YouTube del proyecto muestra el proceso de operación de la rutina de observación.

¹IMFR11GHz-AnexoD-01-Manual de Operacion, youtube vídeo



Figura 4-1.: Alistamiento de sesión de muestreo.

4.3. Mediciones de la fuente extendida

Los datos obtenidos en la sesión de muestreo, después de haber realizado varios barridos del disco solar a diferentes *Baseline*, se procesan en el código de análisis de los datos en *Jupyter notebook*, y se obtienen los máximos y mínimos del patrón de interferencia, para poder calcular la ecuación 2-57; en la figura 4-2 se observa la gráfica de todos los datos de un barrido.

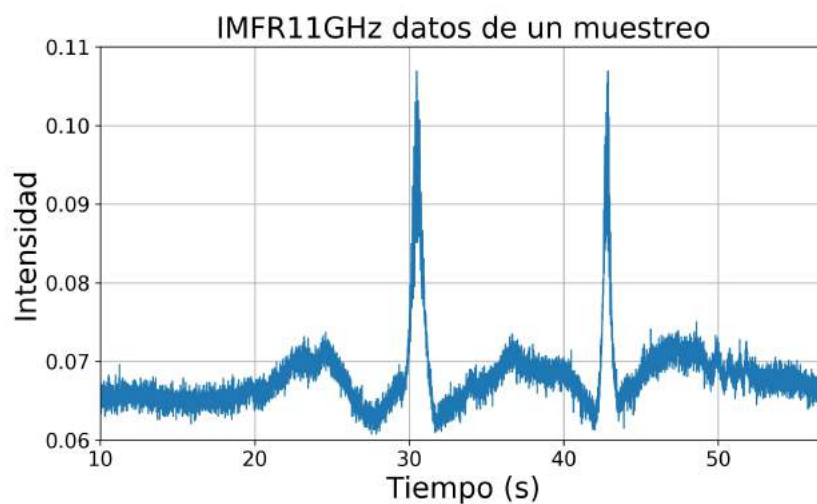


Figura 4-2.: Datos de un barrido del disco solar.

En el eje horizontal esta el tiempo en segundos, este corresponde al tiempo en el cual se movió el interferómetro en azimut cruzando el disco solar y el eje vertical corresponde a la intensidad registrada, específicamente es el voltaje que entrega el detector Diodo Schottky, tal como se explico en la sección 3.2.5. Se observa que antes de los 20 s se tiene señal de ruido o ambiente, entre 10 s y 28 s el haz del interferómetro se acerca al disco solar sin que se produzcan patrones de interferencia. Entre los segundos 28 a 31, hay un pico , que se repite nuevamente en el segundo 43, esto se debe a que el interferómetro regresa a la posición inicial y vuelve y cruza el disco solar. Al realizar un acercamiento o ver en detalle el tiempo alrededor del segundo 30, se observa en la figura 4-3 claramente el patrón de interferencia. También se observa la atenuación del patrón debido a la atenuación de la antena, y se tiene un incremento de la interferencia hasta un máximo para luego decrecer nuevamente, cuando ya se ha salido del disco solar.

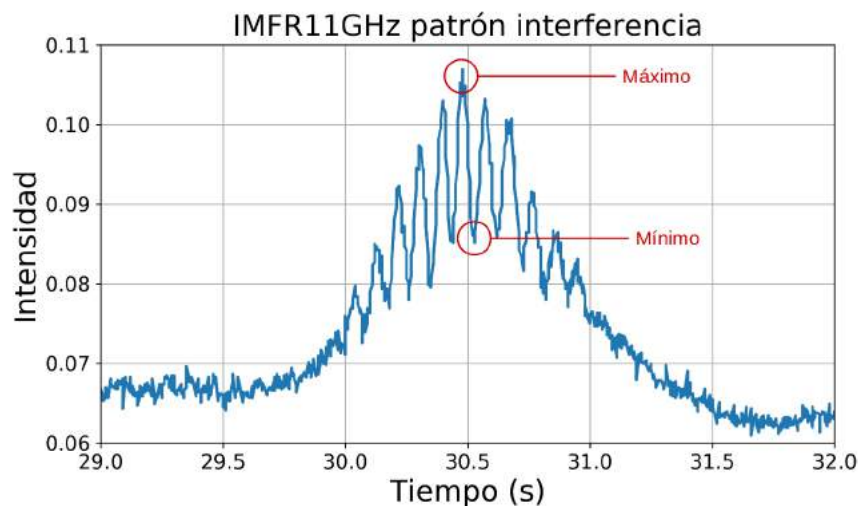


Figura 4-3.: Detalle: Datos de un barrido del disco solar.

En la figura 4-3 se han identificado el máximo y el mínimo del punto mas alto del patrón de interferencia, con los cuales se calcula el valor de la visibilidad para este muestreo a ese *Baseline* determinado. En las figuras 4-4 a 4-24, se observa una sesión completa desde un *Baseline* 940 mm, de ahora en adelante se nombrará como B940, para facilitar la lectura, hasta un B3000.

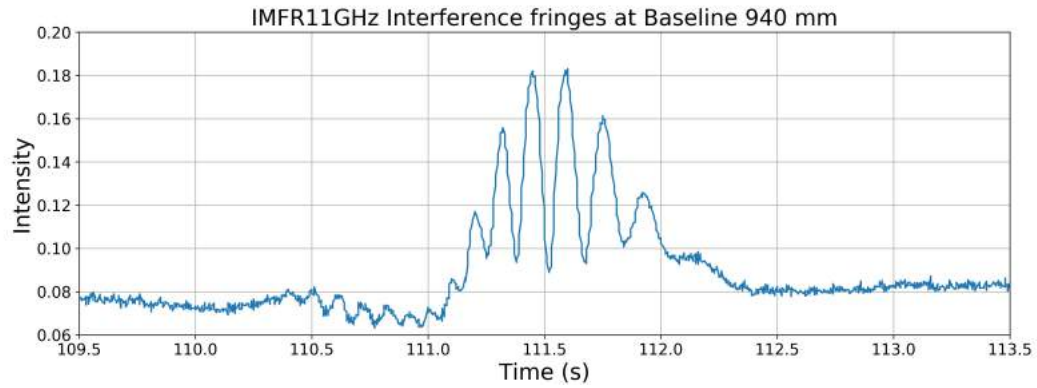


Figura 4-4.: IMFR11GHz: Patrón de interferencia a B940.

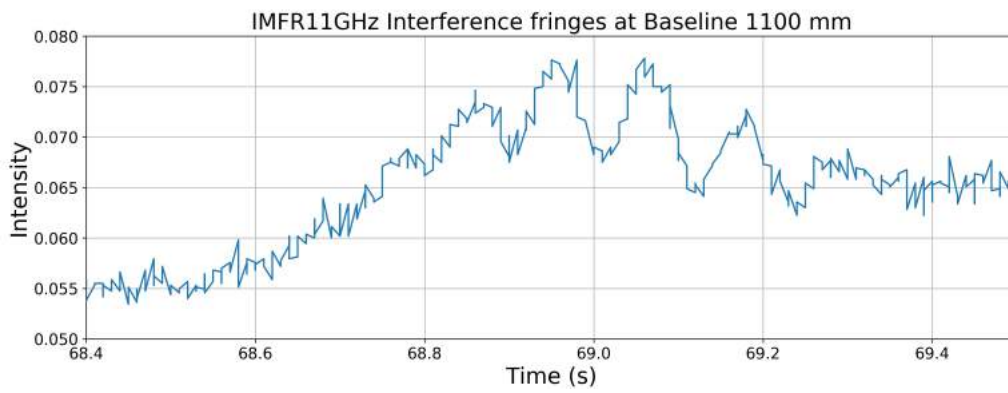


Figura 4-5.: IMFR11GHz: Patrón de interferencia a B1100.

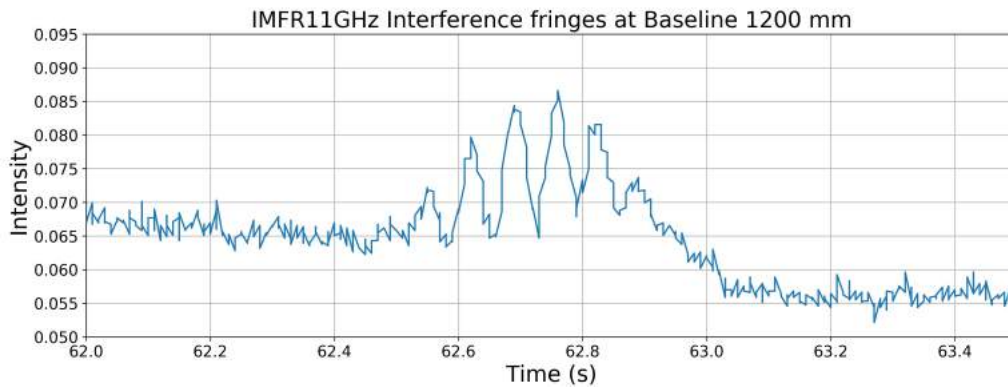


Figura 4-6.: IMFR11GHz: Patrón de interferencia a B1200.

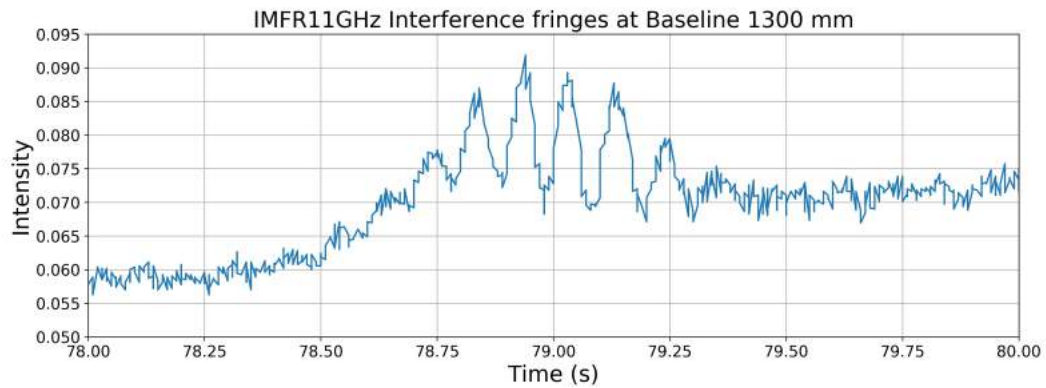


Figura 4-7.: IMFR11GHz: Patrón de interferencia a B1300.

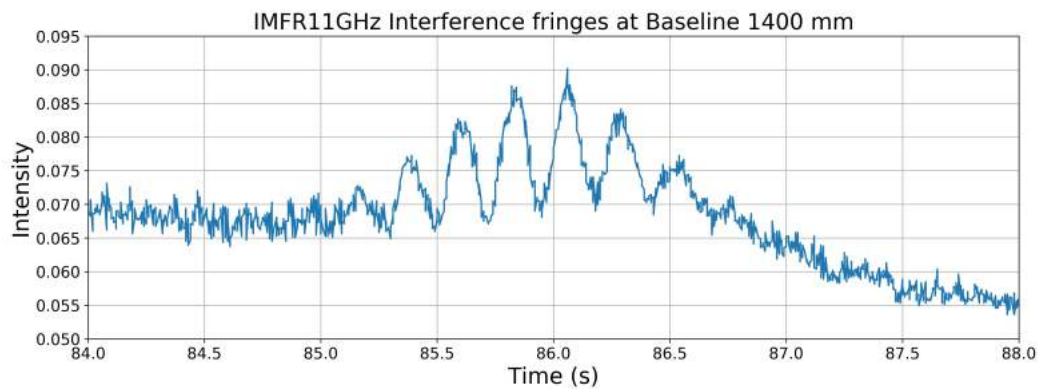


Figura 4-8.: IMFR11GHz: Patrón de interferencia a B1400.

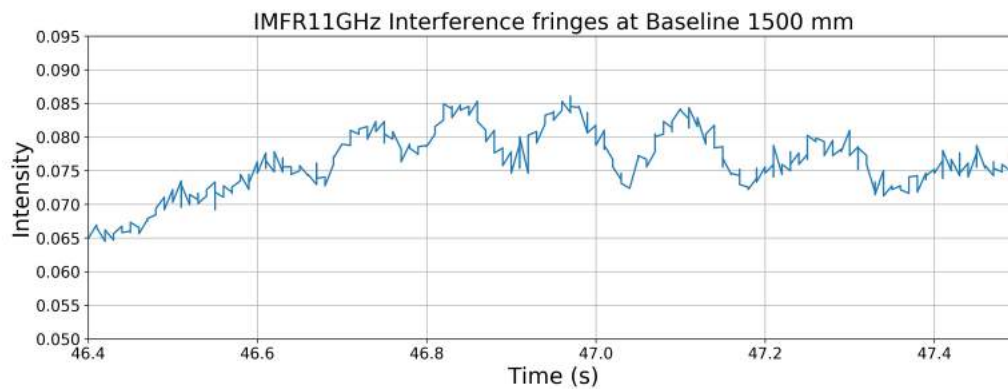


Figura 4-9.: IMFR11GHz: Patrón de interferencia a B1500.

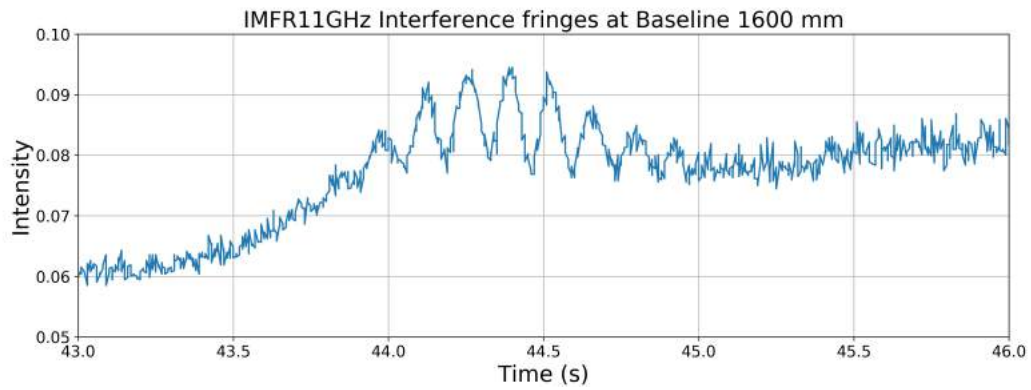


Figura 4-10.: IMFR11GHz: Patrón de interferencia a B1600.

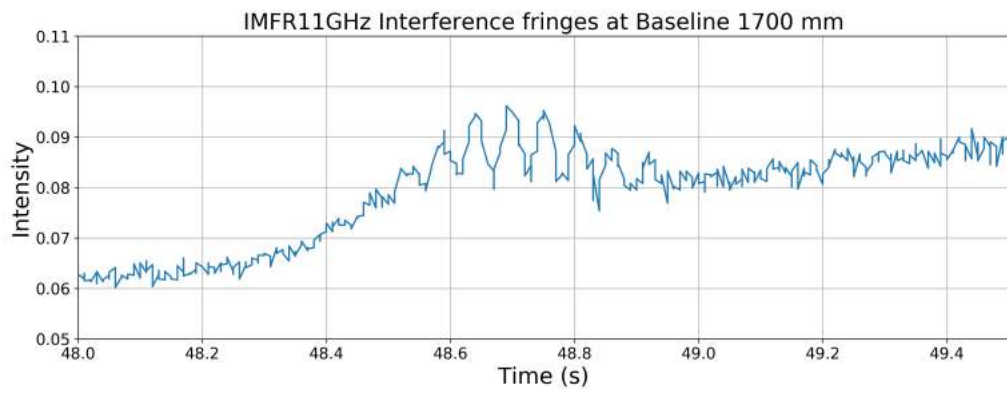


Figura 4-11.: IMFR11GHz: Patrón de interferencia a B1700.

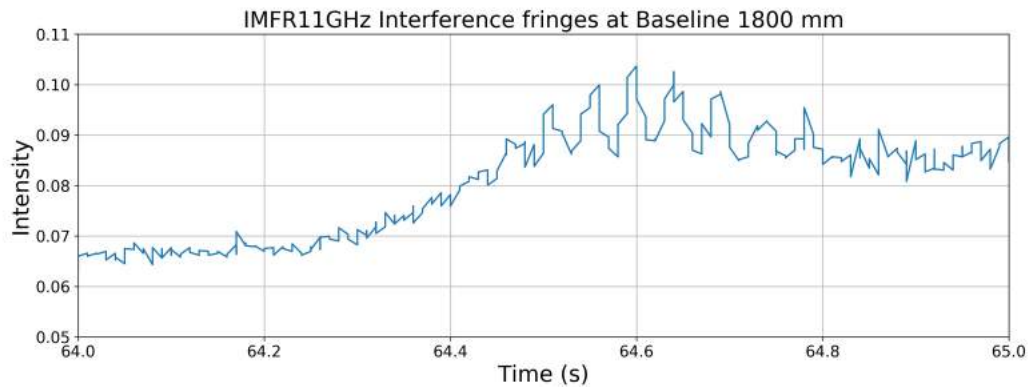


Figura 4-12.: IMFR11GHz: Patrón de interferencia a B1800.

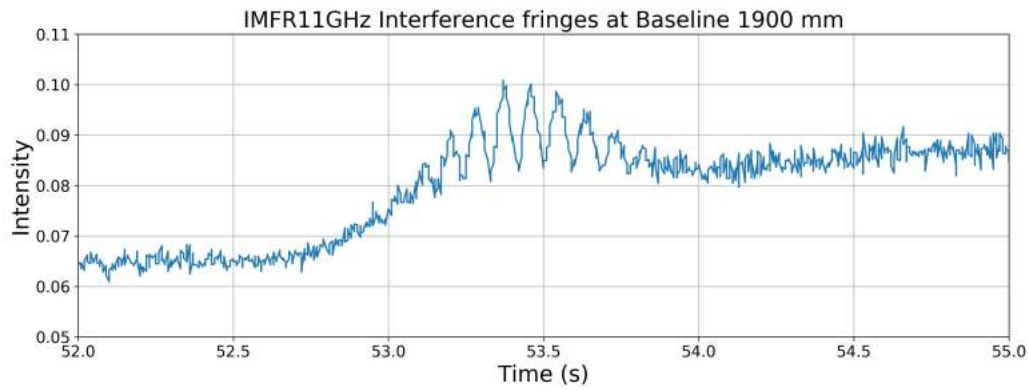


Figura 4-13.: IMFR11GHz: Patrón de interferencia a B1900.

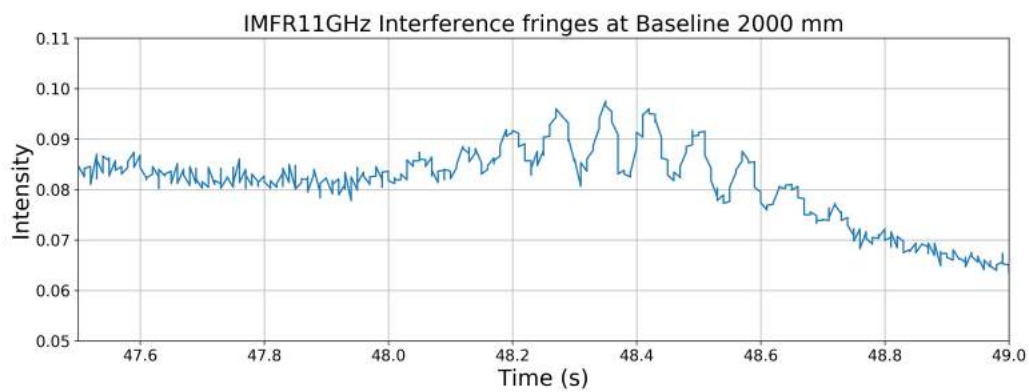


Figura 4-14.: IMFR11GHz: Patrón de interferencia a B2000.

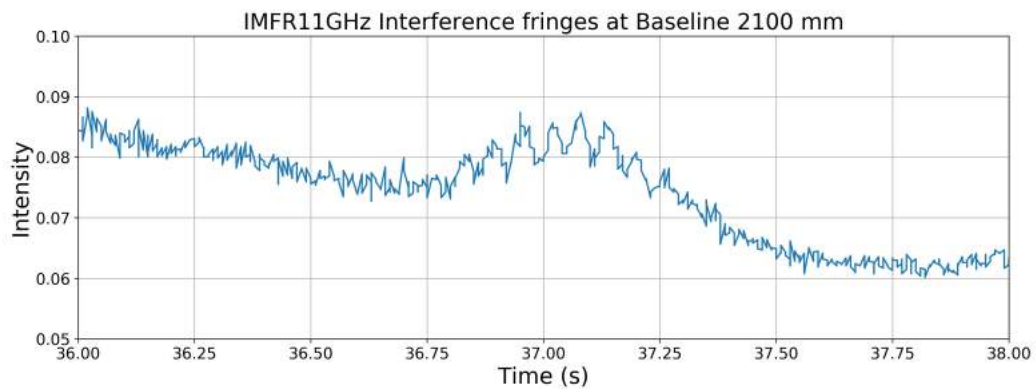


Figura 4-15.: IMFR11GHz: Patrón de interferencia a B2100.

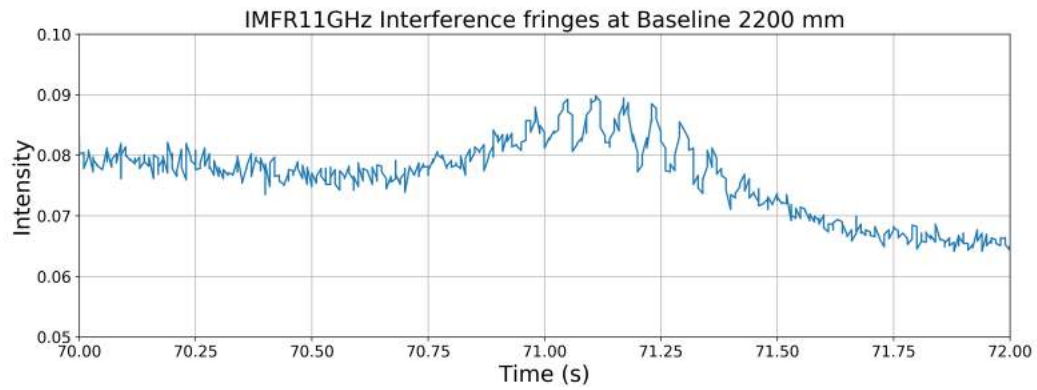


Figura 4-16.: IMFR11GHz: Patrón de interferencia a B2200.

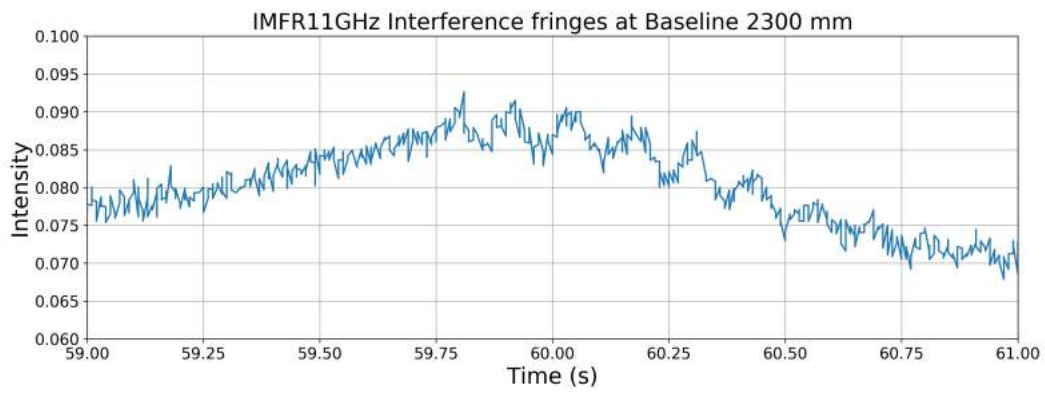


Figura 4-17.: IMFR11GHz: Patrón de interferencia a B2300.

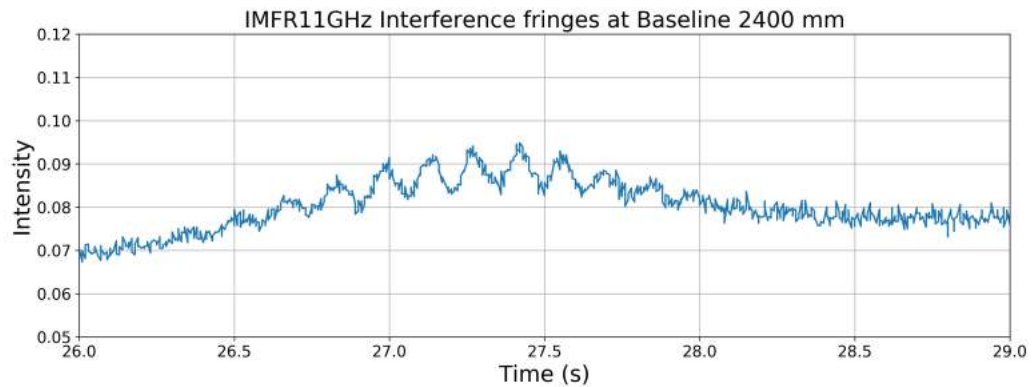


Figura 4-18.: IMFR11GHz: Patrón de interferencia a B2400.

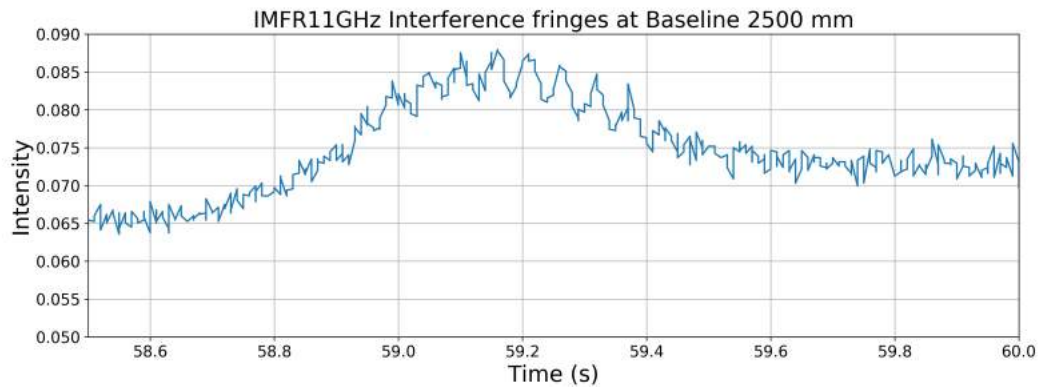


Figura 4-19.: IMFR11GHz: Patrón de interferencia a B2500.

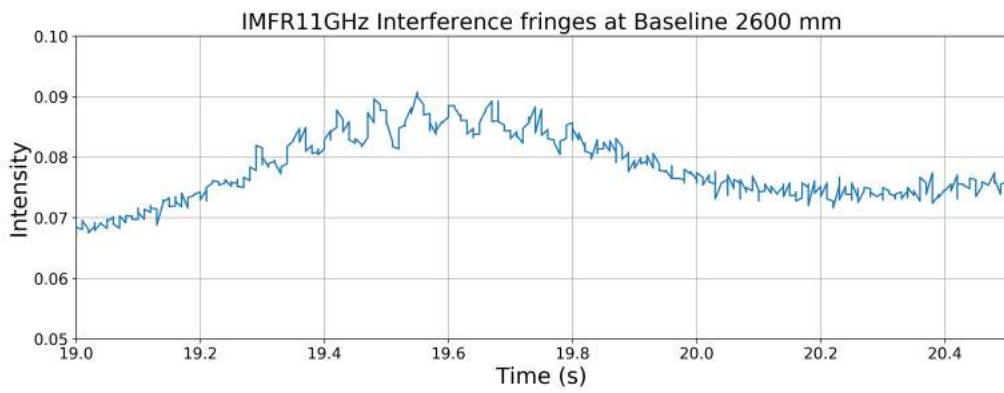


Figura 4-20.: IMFR11GHz: Patrón de interferencia a B2600.

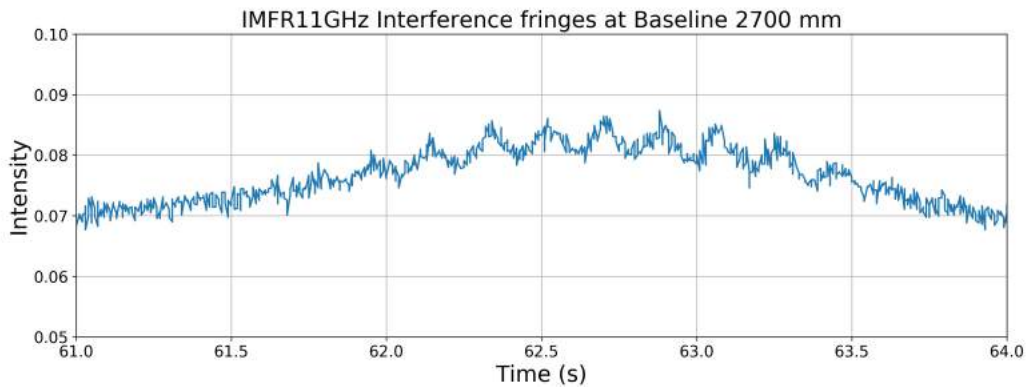


Figura 4-21.: IMFR11GHz: Patrón de interferencia a B2700.

4.3 Mediciones de la fuente extendida

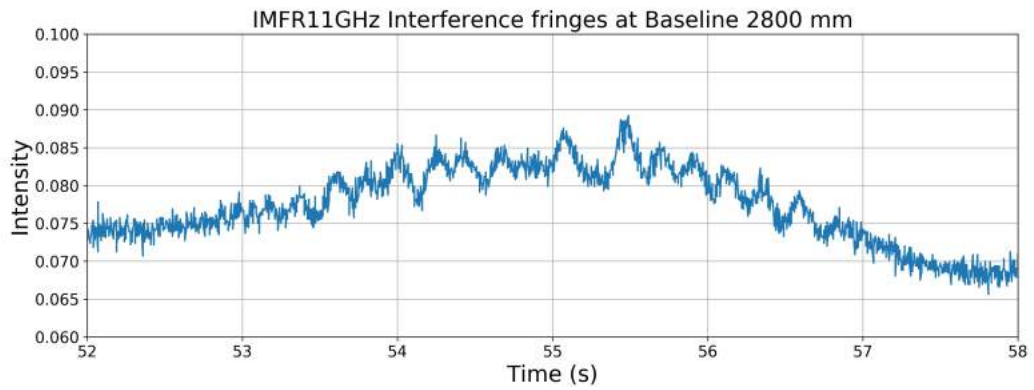


Figura 4-22.: IMFR11GHz: Patrón de interferencia a B2800.

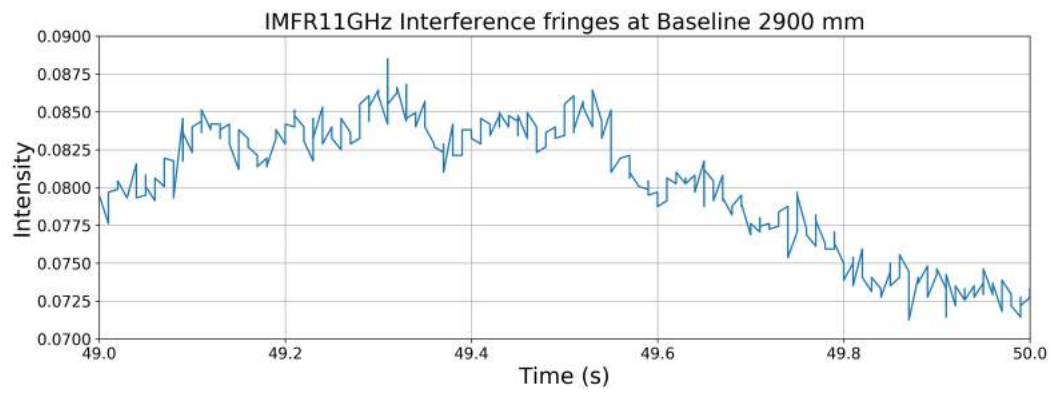


Figura 4-23.: IMFR11GHz: Patrón de interferencia a B2900.

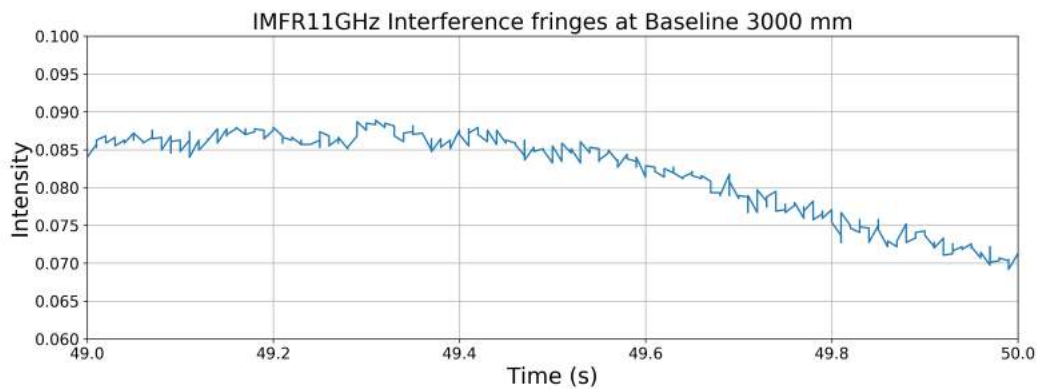



Figura 4-24.: IMFR11GHz: Patrón de interferencia a B3000.

A medida que el *Baseline* aumenta se observa que la diferencia entre el máximo y el mínimo disminuye y se achata el patrón de interferencia, hasta que en B3000 ya no se aprecian *fringes*. En el vídeo  (IMFR11GHz, Animación patrones interferencia, 2018)² en el canal de YouTube del proyecto se puede observar el concepto anterior claramente. Para cada uno de los muestreos anteriores por medio de la rutina en *Jupyter notebook* de análisis de los datos, se identifica la zona de interferencia, se obtienen los valores máximos y mínimos y se calcula la visibilidad. Se recomienda realizar varios muestreos por cada *baseline* para disminuir el error y tener un amplio número de datos. En el anexo B, se tiene la rutina completa y puede observarse el tratamiento de los datos para cada muestreo.

Por ultimo en la tabla **4-1** se listan los valores obtenidos de visibilidad para cada muestreo. En la primera columna aparece el *Baseline*, en la segunda su correspondiente B_λ y en la tercera columna el valor calculado de la Visibilidad.

²IMFR11GHz-Cap4-01-Animacion patrones interferencia, youtube vídeo

Tabla 4-1.: Visibilidad para cada B_λ .

Baseline	Datos de Visibilidad en función de B_λ	
	$B_\lambda = \frac{Baseline}{\lambda}$	Visibilidad; ¹
B940 mm	34.5	0.3462
B1100 mm	40.4	0.0964
B1200 mm	44.0	0.1271
B1300 mm	47.7	0.1269
B1400 mm	51.4	0.1411
B1500 mm	55.0	0.0753
B1600 mm	58.7	0.0999
B1700 mm	62.4	0.0816
B1800 mm	66.0	0.0817
B1900 mm	69.7	0.1104
B2000 mm	73.4	0.0787
B2100 mm	77.1	0.0832
B2200 mm	80.7	0.0762
B2300 mm	84.4	0.0466
B2400 mm	88.1	0.0636
B2500 mm	91.7	0.0553
B2600 mm	95.4	0.0475
B2700 mm	99.1	0.0487
B2800 mm	102.7	0.0514
B2900 mm	106.4	0.0505
B3000 mm	110.1	N/A

¹ Ejemplo de cálculo de visibilidad para una sola medida

Los valores promedio de visibilidad de todos los muestreos de varias sesiones de observación en un periodo corto de tiempo, se ubican en una gráfica de Visibilidad en función de B_λ . En la figura 4-25 se aprecia que la visibilidad es mayor cuando se tiene un haz mas ancho y a medida que se incrementa el B_λ se disminuye la visibilidad, esto ocurre, como se observó en los muestreos, porque la intensidad del patrón de interferencia va disminuyendo y achatandose. En el próximo capítulo, se muestra la curva de ajuste *sinc* y la obtención del diámetro angular del Sol $_{\odot}$.

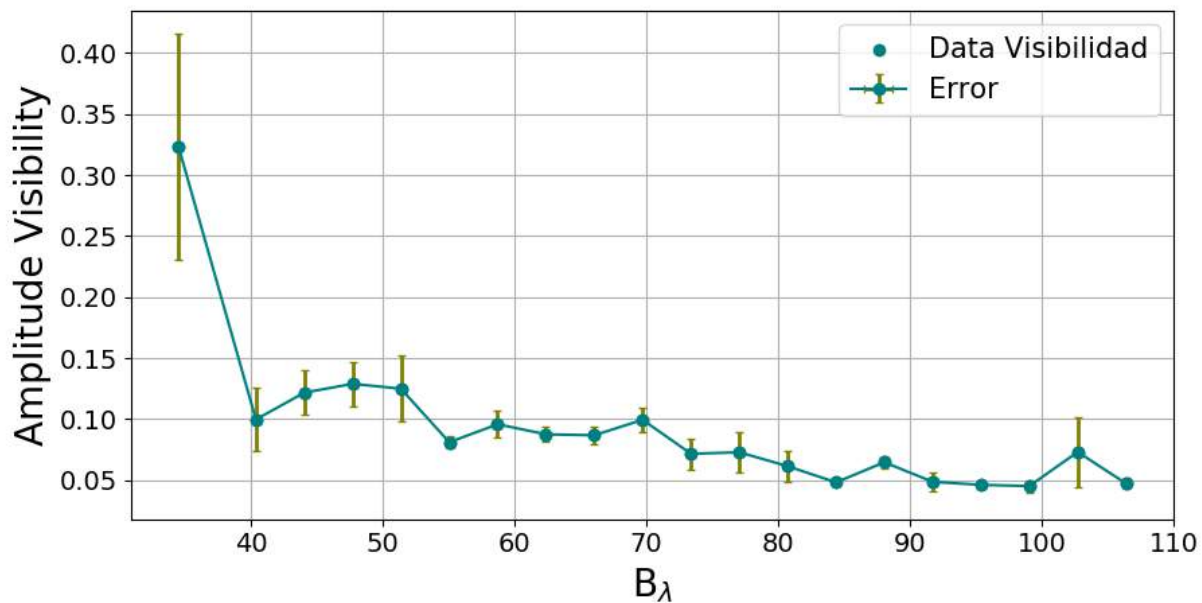


Figura 4-25.: IMFR11GHz: Amplitud de la Visibilidad.

5. Resultados

El objetivo de este trabajo se planteó como la descripción teórica del comportamiento de la interferometría en radio y el desarrollo de un equipo interferométrico en radio para una frecuencia de 11 GHz. Otros objetivos adicionales fueron la realización de mediciones en radio, realizar la interferometría de un objeto extendido y proponer experimentos a nivel académico con el instrumento. Adicional a los objetivos principales del proyecto, se obtuvieron resultados mayores a los inicialmente planteados, ya que durante el proceso se logró apropiarse de conocimiento, técnica y tecnología suficientes para aportar avances en el campo de la radioastronomía en Colombia. Particularmente se logran realizar mediciones en radio con un reflector parabólico sencillo que sirven de comparación a lo realizado con el Interferómetro IMFR11GHz y que apuntan a uno de los objetivos secundarios de presentar laboratorios para la educación, que se pueden ver en el Anexo C. También el desarrollo del *hardware* y *software* basados en una filosofía abierta, para la adquisición de los datos y la conversión digital de los datos análogos, que en otros casos o proyectos se realizan con plataformas cerradas que se convierten en barreras o dependencia tecnológica para el desarrollo de futuros proyectos. Por último las herramientas en códigos libres para el análisis de los datos y obtención de la visibilidad y ajuste de la función *sinc* que es parte funcional de los laboratorios que desarrollarán los estudiantes al utilizar el radio interferómetro.

En las siguientes secciones se muestran los dos resultados principales de este trabajo que son la obtención del diámetro angular del Sol_{\odot} , a partir de la curva de visibilidad y la primera imagen en radio de una fuente extendida como el Sol_{\odot} . Estos resultados no tienen precedentes en la astronomía Colombiana.

5.1. Diámetro angular del Sol

Con la totalidad de los datos de diferentes sesiones, se realiza el cálculo de la visibilidad, en la figura 5-1 se observan todos los datos obtenidos. En el eje horizontal esta B_{λ} , que no tiene unidades al ser una división entre la longitud del *Baseline* de cada medición y la longitud de onda (λ), según la ecuación 2-35. En el eje vertical esta la visibilidad, que también no tiene unidades por ser una división entre los voltajes de la intensidad de los patrones de interferencia, como lo indica la ecuación 2-57.

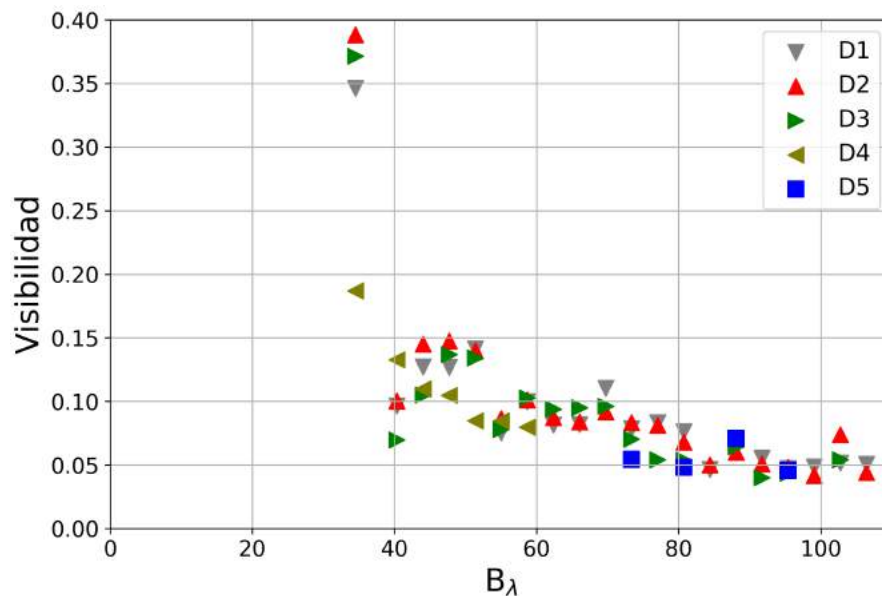


Figura 5-1.: IMFR11GHz: Datos de visibilidad de varias sesiones.

A este grupo de datos se realiza el ajuste de la función *sinc* según la ecuación 2-59. El ajuste se

realiza con una rutina en *Jupyter notebook*, ajustándose la función de prueba de la ecuación 5-1 por medio del algoritmo Levenberg–Marquardt que realiza el ajuste de la curva con el método de mínimos cuadrados sobre el conjunto de los datos, obteniendo los parámetros de la función, tales que la suma de los cuadrados de sus desviaciones es mínima. En la figura 5-2 se observa el ajuste.

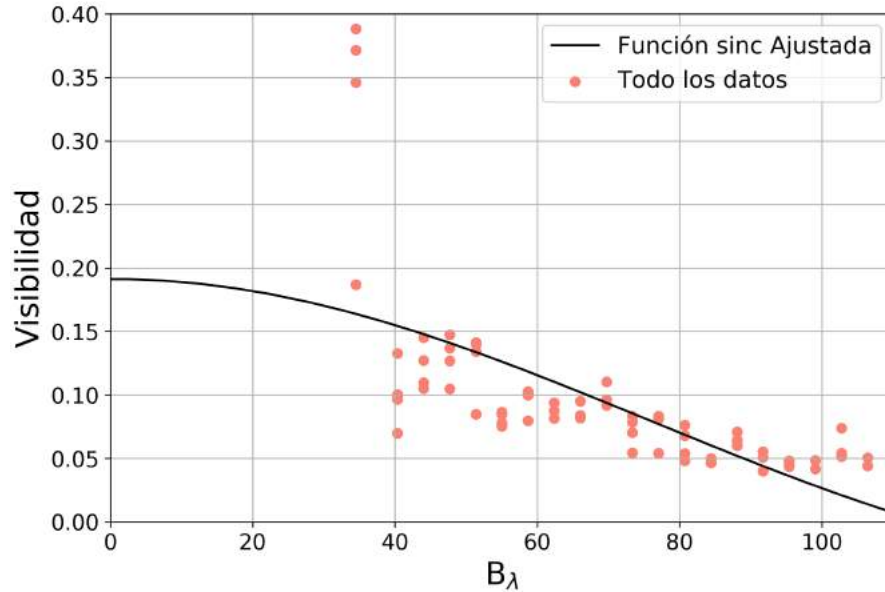


Figura 5-2.: IMFR11GHz: Ajuste función sinc a los datos de amplitud de la visibilidad.

$$F_{\text{prueba}}(x) = \left[P_1 \cdot \frac{\sin[P_2\pi(x)]}{P_2\pi(x)} \right] \quad (5-1)$$

Donde, P_1 , P_2 son los parámetros. Obteniéndose $P_1 = 0,1913$, $P_2 = 0,00875$. Los errores para cada uno de los parámetros son los siguientes:

$$P_1 = 0.1913 \pm 0.0162$$

$$P_2 = (8.755 \pm 0.512) \times 10^{-3}$$

Con este ajuste se obtiene el primer punto cero (*null*) en el eje x aproximadamente en $B_\lambda = 114,27$, sobre el eje horizontal, como se observa en la figura 5-3. Utilizando los resultados de ajuste de los

parámetros de la función *sinc* se gráfica las funciones ajustadas con los parámetros más su error y menos su error, como se muestra en la figura 5-4, estas definen los límites del ajuste.

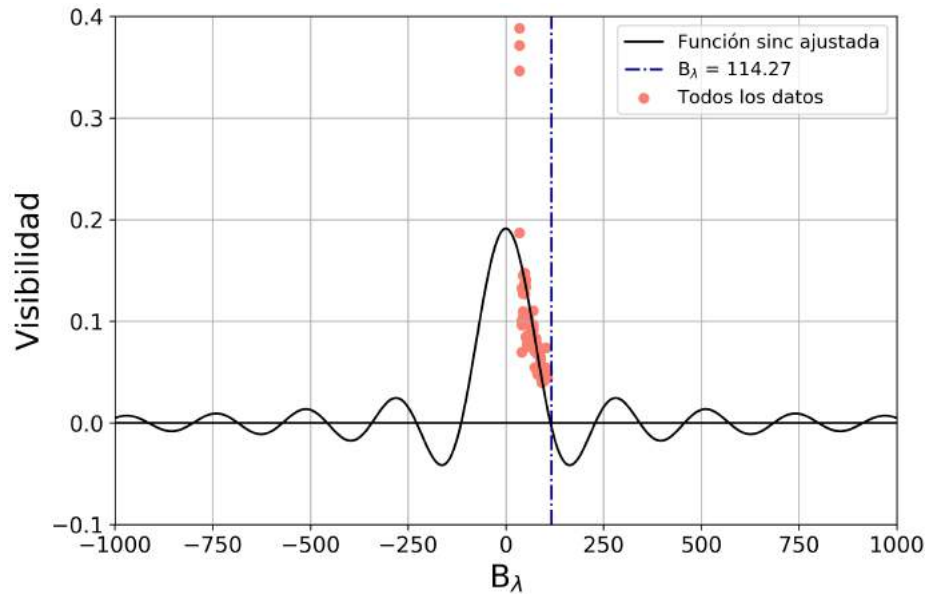


Figura 5-3.: IMFR11GHz: Función sinc ajustada y determinación primer cero de la función.

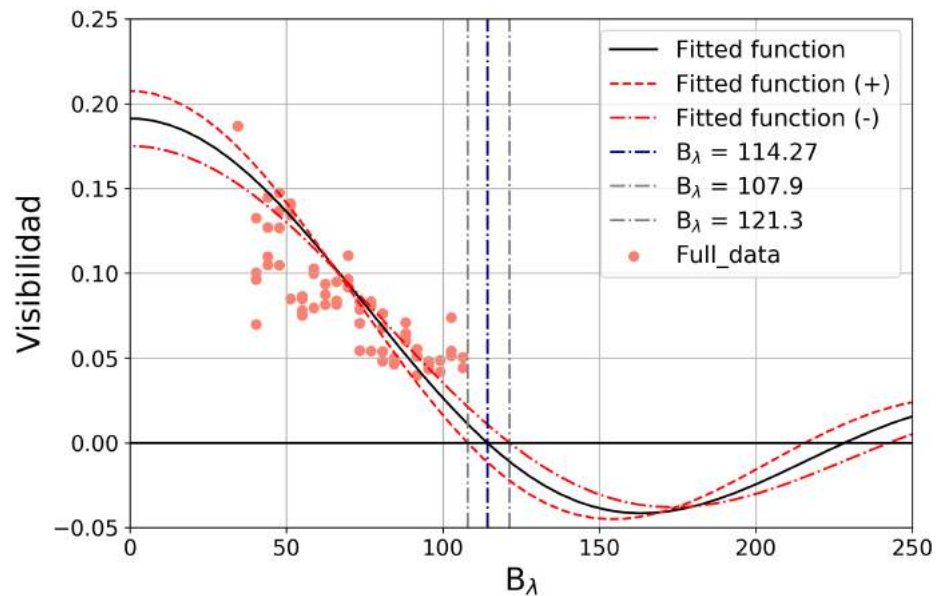


Figura 5-4.: IMFR11GHz: Función sinc ajustada y Límites de ajuste según los parámetros de la función y sus errores respectivos.

5.1 Diámetro angular del Sol

Ahora bien como se describió en la sección 2.4 sobre la Fuente extendida y visibilidad el inverso de este resultado ($1/B_\lambda$) es el tamaño angular de la componente de Fourier en radianes. Por lo tanto teniendo en cuenta el error de los parámetros de ajuste y realizando el siguiente cálculo se tiene que el diámetro angular del Sol $_{\odot}$ a una frecuencia de 11GHz en minutos de arco es:

$$\delta_{\odot} \equiv \left(\frac{1}{114.27} \right) \cdot \left(\frac{360}{2\pi} \right) \cdot 60 \equiv 30.08 \text{ arc min} \pm 1.76 \text{ arc min.}$$

En la figura 5-5 se muestra datos de la relación entre el diámetro angular en radio y el diámetro angular en el óptico, a longitudes de onda de 3 y 10.7 cm, en periodos de máxima y mínima actividad solar, realizadas en el observatorio de Toyokawa [7, Das, Sarkar, y Sen 2000]. En el eje horizontal el número de manchas solares y en el eje vertical la relación r . Se observa que para los datos a longitud de onda de 3.0 cm, la relación r tiene un valor de 1.12 cuando es un mínimo solar, como corresponde al momento de las sesiones de muestreo de los datos del IMFR11GHz. Con esta información y con el resultado obtenido del diámetro angular se propone calcular el diámetro físico del Sol $_{\odot}$.

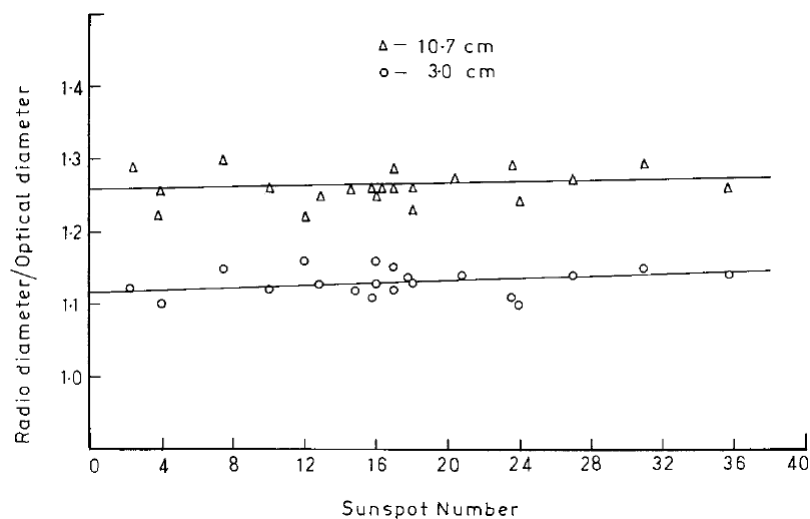


Figura 5-5.: Dependencia de la relación r durante el mínimo solar en 1985-1986 a longitudes de onda λ de 10.7 cm y 3 cm. Das, Sakar y Sen 2000.

$$r = \frac{\delta_{\text{radio}\odot}}{\delta_{\text{Visible}\odot}}. \quad (5-2)$$

Según la ecuación 5-2 se tiene que:

$$\delta_{\text{Visible}\odot} = \frac{30.08 \text{ arcmin}}{1,12},$$

$$\delta_{\text{Visible}\odot} = 26.85 \text{ arcmin},$$

En el momento de obtención de los datos, un arco segundo fue equivalente a 733.17 km en el Sol \odot ,

$$D_{\odot} = \delta_{\text{Visible}\odot} \cdot 60 \cdot 733.17 \text{ km},$$

$$D_{\odot} = 1181624 \text{ km} \pm 5.8 \%.$$

Este calculo del diámetro físico se acerca al dato vigente en la actualidad, el cual es de 1'392.000 km, representando un error porcentual del 15 %, confirmando que el instrumento funciona dentro de limites diseñados y es apto para realizar laboratorios y obtener datos confiables para el entendimiento de la radio interferometría y la radio astronomía a 11 GHz.

5.2. Imagen 2D del Sol a 11GHz

Realizando un barrido en altura (sistema de rotación a velocidad constante) en un punto distante en el cielo por encima de Sol_{\odot} y alejado unos grados en azimut, y repitiendo cada vez este barrido en diferentes azimut hasta sobrepasar el Sol_{\odot} , es posible reconstruir una imagen de la intensidad o Potencia Total. Este proceso en radio astronomía se conoce como mapeo del cielo.

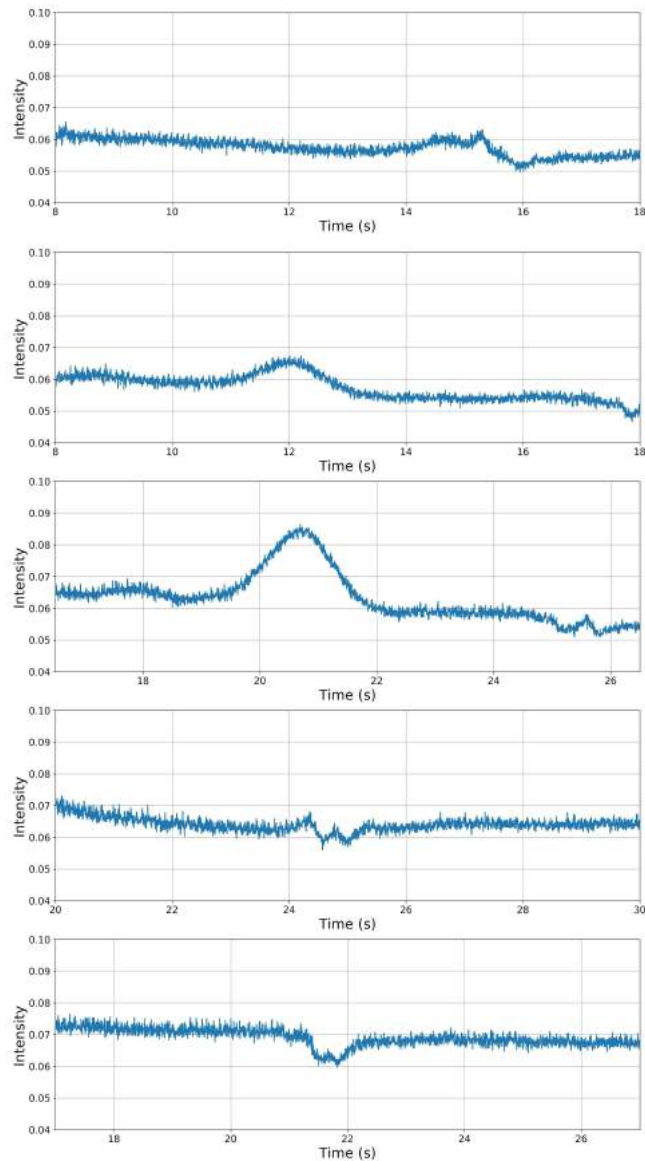


Figura 5-6.: IMFR11GHz: Barrido en altura a diferentes azimut.

Debido a que el sistema de rotación en altura, no posee un encoder o sensor de inclinación integrado al sistema de captura de datos, se realiza el cálculo de variación angular en función del tiempo para determinar la posición en altura del barrido mientras desciende. Luego se realiza una interpolación Gaussiana de los datos y se ajusta la relación de aspecto para obtener la siguiente imagen del Sol_☉ en 2D a 11GHz ($\lambda = 2,7$ cm).

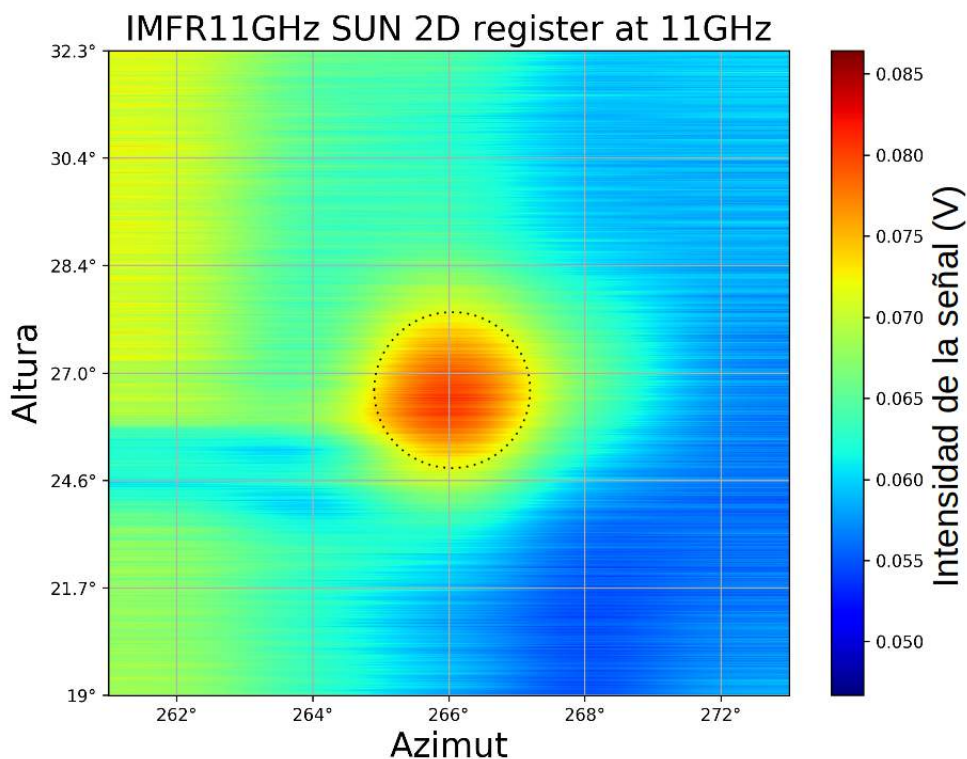


Figura 5-7.: IMFR11GHz: Imagen 2D Sol_☉ a 11GHz.

En esta imagen el radio interferómetro esta configurado a un B1600, que corresponde a un *Beam* de 1°. Se observa una zona de alta intensidad que corresponde al paso del *Beam* por el disco solar y zonas de baja intensidad al costado derecho que corresponden al cielo abierto, sin fuentes de radio conocidas, y al costado izquierdo zonas de media intensidad que pueden corresponder a reflexiones en superficies como la cúpula del Observatorio y una antena yagi cercana al radio interferómetro.

5.2 Imagen 2D del Sol a 11GHz

Estos resultados representan un logro satisfactorio para este instrumento, tanto para el proyecto, como para el avance de la radio astronomía en el país, ya que posibilitan realizar observaciones de fuentes extendidas de una forma práctica y fácil de abordar por estudiantes e investigadores; también porque es posible realizar modificaciones al sistema interferométrico, incluso implementar otros tipos de antena en otras longitudes de onda, permitiendo realizar estudios alternativos al desarrollado en este trabajo, como operar apoyando actividades en telemetría a satélites.

En el próximo capítulo se plasman las conclusiones mas importantes del proyecto, tanto en el cumplimiento de sus objetivos principales como secundarios, como en conclusiones de avances o resultados alternos al desarrollo de alcance principal. También se escriben recomendaciones a nivel del instrumento, de la maestría y del futuro de la radio astronomía en el país.

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

La oportunidad de desarrollar ciencia, educación y apropiación de tecnología y conocimiento en radioastronomía para nuestro país es única; ya que existe el capital humano, excelentes profesionales en diferentes disciplinas y la facilidad del acceso a una economía global. Lo anterior sumado a una capacidad casi instantánea de compartir y manipular información, posibilita realizar desarrollos propios con el material científico del país. Es viable en unión con la industria vigente emprender proyectos novedosos y únicos, que hace algunos lustros era prácticamente imposible.

Con proyectos de desarrollo de instrumentación para astronomía o radioastronomía, se logra afianzar conceptos de astrofísica, óptica, ondas, mecánica, programación, telecomunicaciones y automatización. En cierta medida se apropia tecnología y se construyen componentes y equipos que serán un peldaño mas en lograr pasar de un desconocimiento práctico a entender y a aventurarse cada vez mas a realizar proyectos multidisciplinarios de mayor envergadura que logren posicionar la radioastronomía colombiana en la región.

Diseñar y construir un radio interferómetro tipo Michelson representa un gran avance en el entendimiento de la radioastronomía y la interferometría, además que su enfoque servirá como base

para la educación de estudiantes de pregrado y posgrado, que sin duda replicaran y ampliaran lo desarrollado en el presente trabajo.

El objetivo principal de este proyecto fue comprender y aplicar los conocimientos adquiridos por medio de la recopilación de información, aplicación de los principios de interferencia aditiva (Tipo Michelson) y la experimentación en campo mediante la construcción de un instrumento que utiliza un arreglo interferométrico para lograr obtener el diámetro angular de una fuente extendida.

Durante el desarrollo del presente trabajo se destacan las siguientes conclusiones:

1. Este radio interferómetro tipo Michelson desarrollado y adaptado para la localización geográfica de Colombia - Bogotá es un trabajo novedoso y sin precedentes, que permite entender las ventajas de la radioastronomía y la interferometría para situaciones en donde los cielos están nublados y aun así es posible observar cuerpos celestes a esta frecuencia de operación (11GHz).
2. La interferencia aditiva de la señal se logra por su configuración geométrica y por el barrido en azimut del disco solar, a diferencia de la interferometría con correladores como en el caso del exitoso proyecto FiCoRI [8, J.C Guevara, FiCoRI].
3. El radio interferómetro IMFR11GHz tiene la capacidad de apuntar a su fuente de estudio. Esta cualidad permite una versatilidad sin precedente en la radioastronomía del país, además por su amplitud de *Baseline* puede resolver fuentes extendidas hasta de 0.5° .
4. La implementación y diseño del instrumento, permitirá en un desarrollo futuro de menor escala realizar seguimiento continuo a fuentes extendidas y en especial al Sol_\odot para poder monitorear en una frecuencia de 11GHz su actividad.

5. Uno de los principales logros de este trabajo ha sido el desarrollo y apropiación de instrumentación de manejo y procesamiento de la señal y adquisición y tratamiento de datos bajo una filosofía abierta, libre y replicable.
6. Los patrones de interferencia *fringes* varían dependiendo de la distancia de separación *Baseline*. Se presentan *fringes* mas definidos, es decir con una variación significativa entre el máximo y mínimo (Visibilidad), a *Baseline* mas cortos y van disminuyendo al aumentar el *Baseline*.
7. Dentro de las metas y objetivos específicos del proyecto cumplidos fue lograr obtener el diámetro del Sol_☉, que resultó estar cercano a resultados obtenidos por otros autores y observatorios en el mundo.
8. Durante el proceso de obtener estos resultados se logró experimentar con la construcción de imágenes en radio (2.7 cm) del cielo desde la ubicación del Observatorio Astronómico Nacional, obteniendo la primera imagen en radio del Sol_☉ A 11GHz en la historia de la astronomía en Colombia.
9. Como última conclusión se tiene el desarrollo de laboratorios en radioastronomía que van desde el uso de una antena simple hasta la visualización de fuentes extendidas por medio de la interferometría de suma, que podrán ser sustento de futuras clases o laboratorios para estudiantes en materias como Técnicas Observacionales o nuevas asignaturas.

6.2. Recomendaciones

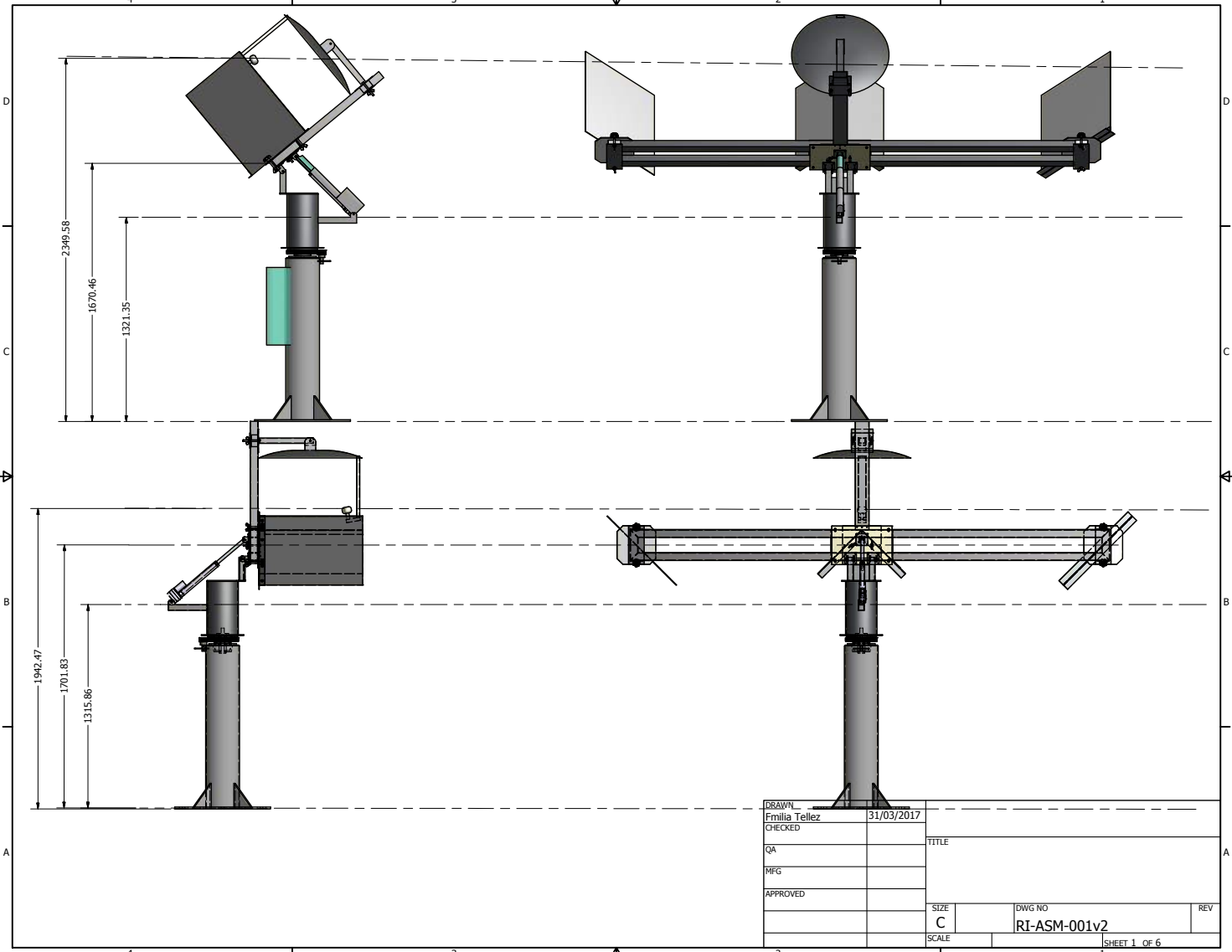
Después de desarrollar un proyecto tan apasionante y lleno de retos, quedan muchas lecciones aprendidas, mucho conocimiento y desarrollos para la universidad y el país. También quedan un sin

numero de recomendaciones para futuros trabajos, para nuevos proyectos multidisciplinarios y para el avance de la astronomía en Colombia. A continuación se listan algunas de estas recomendaciones:

1. Se recomienda orientar proyectos de grado de pregrado en automatizar completamente al radio interferómetro IMFR11GHz de tal forma que pueda hacer seguimiento constante a el Sol_{\odot} .
2. Se recomienda propiciar a que se realicen mas proyectos de grado a nivel maestría y doctorado en áreas de la astronomía como instrumentación astronómica y radioastronomía.
3. Se propone crear asignaturas nuevas con enfoque practico y teórico en radioastronomía en donde se pueda utilizar y realizar los laboratorios propuestos en este trabajo.
4. Se debe formar y apoyar a los estudiantes de maestría en astronomía en técnicas de programación en *Python* que permiten el manejo y procesamiento de gran cantidad de datos, algo que en radioastronomía en común.
5. Se recomienda realizar esfuerzos para que los proyectos de esta índole sean mutidisciplinarios, de tal forma que puedan vincularse varios proyectos de grado de maestría o de pregrado de varias disciplinas como Telecomunicaciones, Ingeniería, Óptica, Electrónica y Mecánica que pueden estar inmersos dentro de un programa o proyecto de Doctorado.
6. Este tipo de proyectos deben acercarse a la industria, ya que al apropiar tecnología posibilitan el desarrollo y el emprendimiento, generación de microempresas o *spin-off* dedicados a fabricación de componentes, instrumentos, receptores, emisores, procesamiento de datos y *Big data*
7. Con este trabajo, con los realizados hace unos años y con los futuros, es posible desde ya generar espacios de dialogo a nivel universitario y nacional para generar políticas de desarrollo de la Radioastronomia a un nivel profesional.

A. Anexo: Planos mecánicos

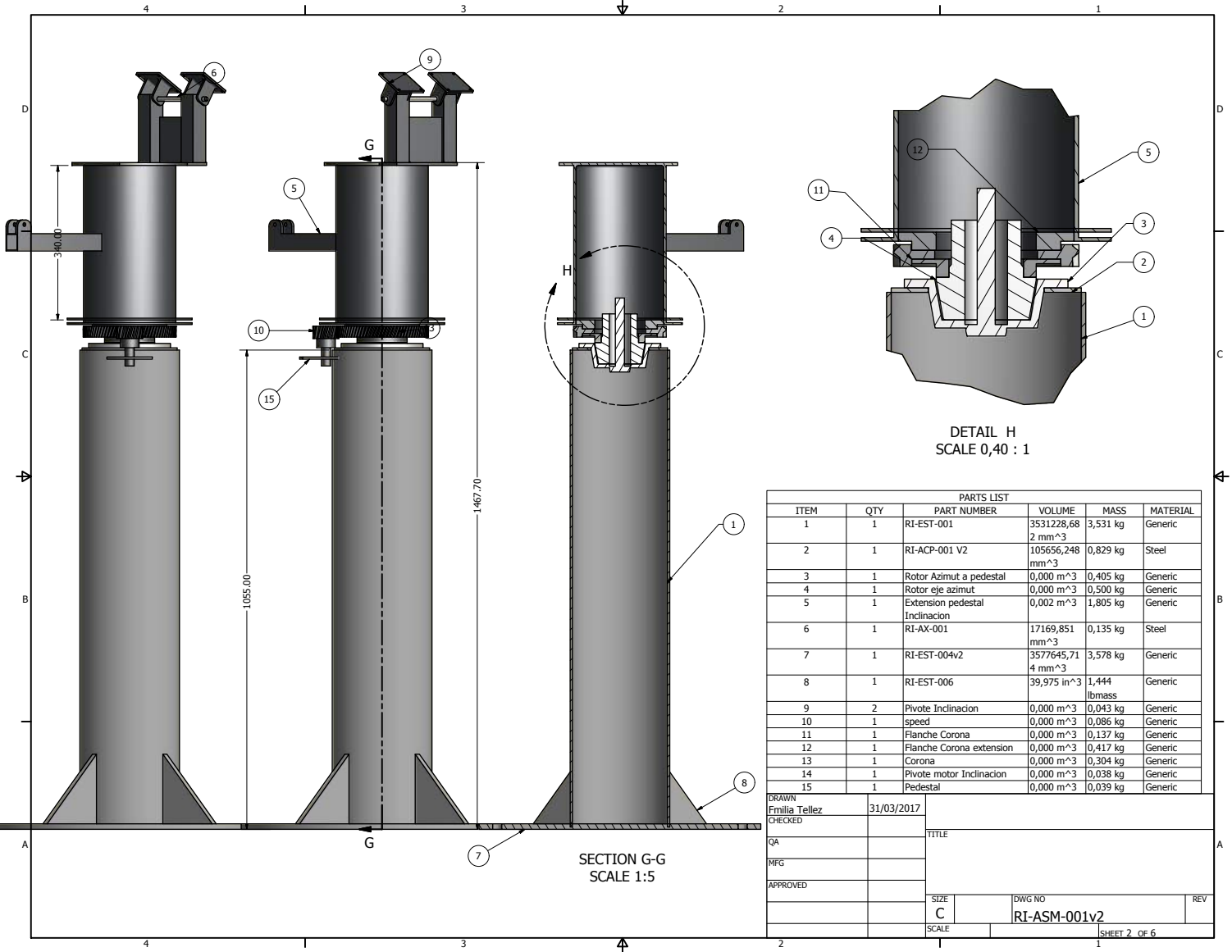
En este anexo se presentan los planos mecánicos del radio interferómetro. Pueden ser consultados en el repositorio de GitHub. <https://github.com/IMFR11Ghz>



2349.58
1670.46
1321.35

1942.47
1701.83
1315.86

DRAWN		31/03/2017	
Fmilia Tellez			
CHECKED		TITLE	
QA			
MFG			
APPROVED			
SCALE	C	DWG NO	REV
		RI-ASM-001v2	
			SHEET 1 OF 6

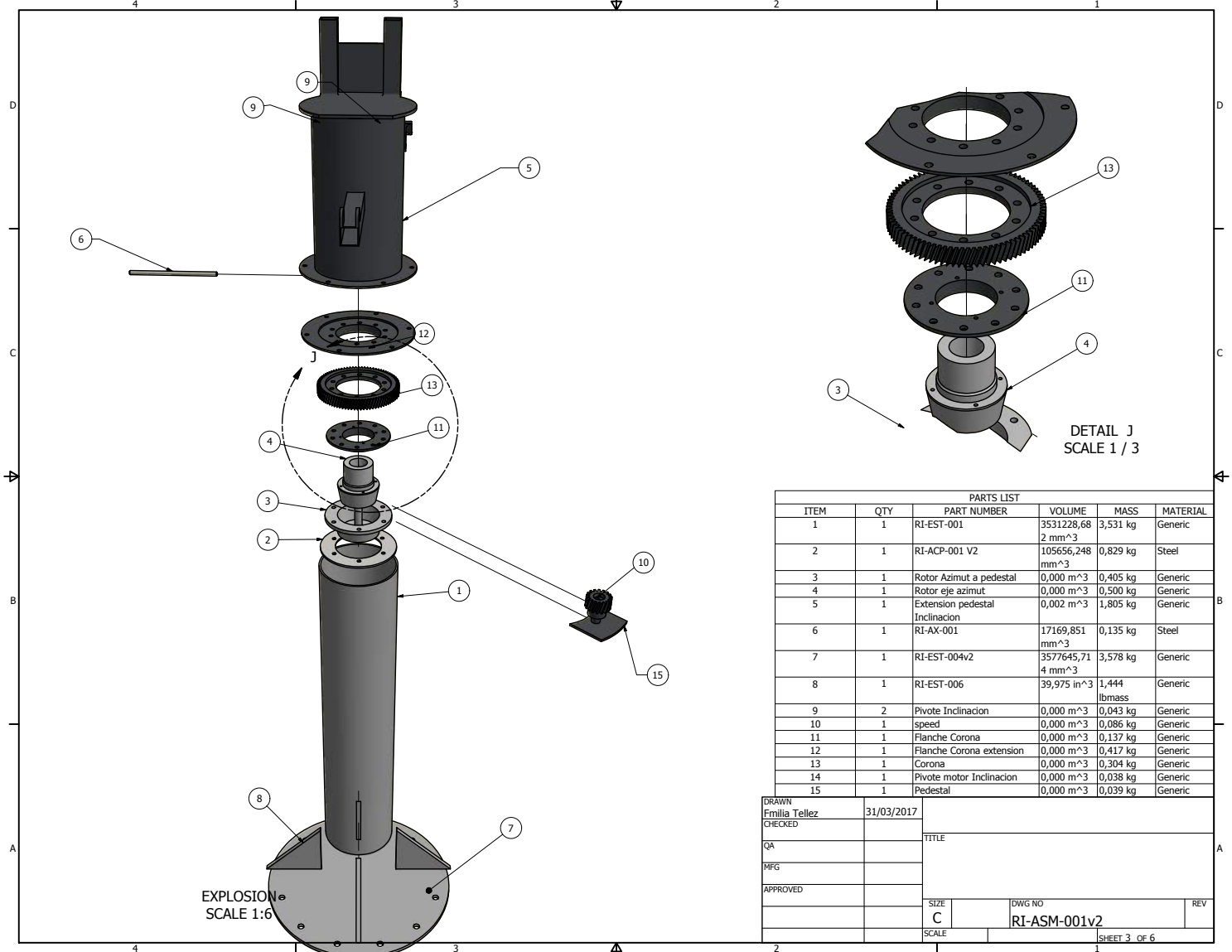


DETAIL H
SCALE 0,40 : 1

SECTION G-G
SCALE 1:5

PARTS LIST					
ITEM	QTY	PART NUMBER	VOLUME	MASS	MATERIAL
1	1	RI-EST-001	3531228,68 2 mm ³	3,531 kg	Generic
2	1	RI-ACP-001 V2	105656,248 mm ³	0,829 kg	Steel
3	1	Rotor Azimut a pedestal	0,000 m ³	0,405 kg	Generic
4	1	Rotor eje azimut	0,000 m ³	0,500 kg	Generic
5	1	Extension pedestal Inclinacion	0,002 m ³	1,805 kg	Generic
6	1	RI-AX-001	17169,851 mm ³	0,135 kg	Steel
7	1	RI-EST-004v2	3577645,71 4 mm ³	3,578 kg	Generic
8	1	RI-EST-006	39,975 in ³	1,444 lbmass	Generic
9	2	Pivote Inclinacion	0,000 m ³	0,043 kg	Generic
10	1	speed	0,000 m ³	0,086 kg	Generic
11	1	Flanche Corona	0,000 m ³	0,137 kg	Generic
12	1	Flanche Corona extension	0,000 m ³	0,417 kg	Generic
13	1	Corona	0,000 m ³	0,304 kg	Generic
14	1	Pivote motor Inclinacion	0,000 m ³	0,038 kg	Generic
15	1	Pedestal	0,000 m ³	0,039 kg	Generic

DRAWN	Fmilla Tellez	31/03/2017		
CHECKED				
QA			TITLE	
MFG				
APPROVED				
SIZE	C	DWG NO	RI-ASM-001v2	REV
SCALE		SHEET 2 OF 6		

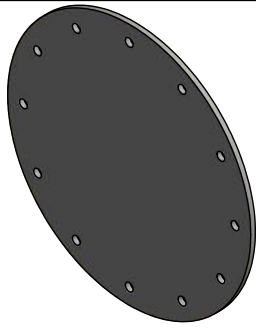
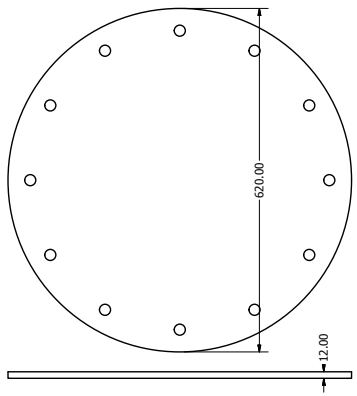


EXPLOSION
SCALE 1:6

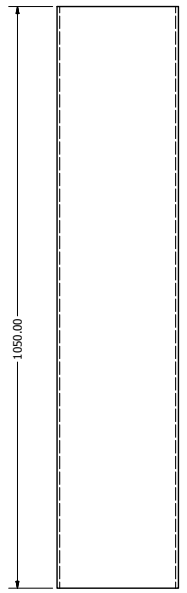
DETAIL J
SCALE 1 / 3

PARTS LIST					
ITEM	QTY	PART NUMBER	VOLUME	MASS	MATERIAL
1	1	RI-EST-001	3531228,68 2 mm ^{^3}	3,531 kg	Generic
2	1	RI-ACP-001 V2	105656,248 mm ^{^3}	0,829 kg	Steel
3	1	Rotor Azimut a pedestal	0,000 m ^{^3}	0,405 kg	Generic
4	1	Rotor eje azimut	0,000 m ^{^3}	0,500 kg	Generic
5	1	Extension pedestal Inclinacion	0,002 m ^{^3}	1,805 kg	Generic
6	1	RI-AX-001	17169,851 mm ^{^3}	0,135 kg	Steel
7	1	RI-EST-004v2	3577645,71 4 mm ^{^3}	3,578 kg	Generic
8	1	RI-EST-006	39,975 in ^{^3}	1,444 lbmass	Generic
9	2	Pivote Inclinacion	0,000 m ^{^3}	0,043 kg	Generic
10	1	speed	0,000 m ^{^3}	0,086 kg	Generic
11	1	Flanche Corona	0,000 m ^{^3}	0,137 kg	Generic
12	1	Flanche Corona extension	0,000 m ^{^3}	0,417 kg	Generic
13	1	Corona	0,000 m ^{^3}	0,304 kg	Generic
14	1	Pivote motor Inclinacion	0,000 m ^{^3}	0,038 kg	Generic
15	1	Pedestal	0,000 m ^{^3}	0,039 kg	Generic

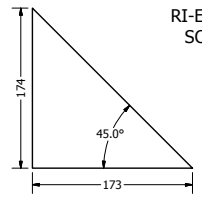
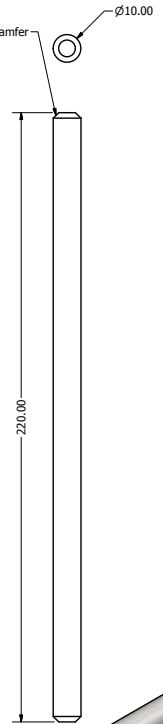
DRAWN	Fmilla Tellez	31/03/2017			
CHECKED			TITLE		
QA					
MFG					
APPROVED					
	SIZE	C	DWG NO	RI-ASM-001v2	REV
	SCALE		SHEET 3 OF 6		



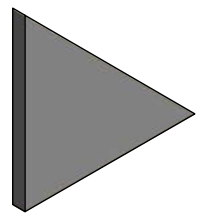
RI-EST-004V2
SCALE 1:5



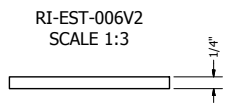
RI-EST-001
SCALE 1:5



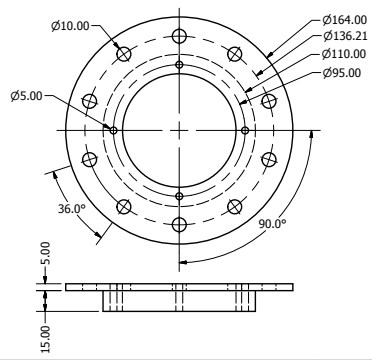
RI-EST-004V2
SCALE 1:5



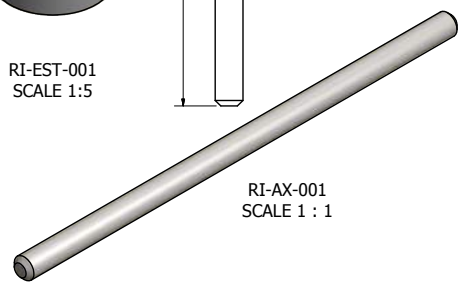
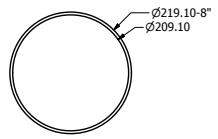
RI-EST-006V2
SCALE 1:2



RI-EST-006V2
SCALE 1:3

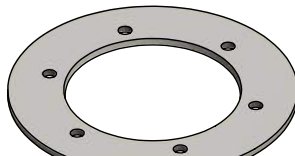
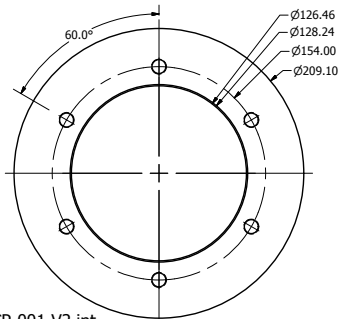


FL Corona
SCALE 1 : 2

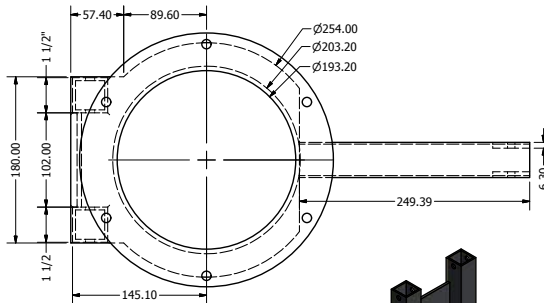


RI-AX-001
SCALE 1 : 1

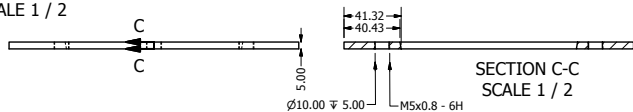
DRAWN	Fmilia Tellez	31/03/2017		
CHECKED			TITLE	
QA				
MFG				
APPROVED				
			SIZE	DWG NO
			C	RI-ASM-001v2
			SCALE	REV



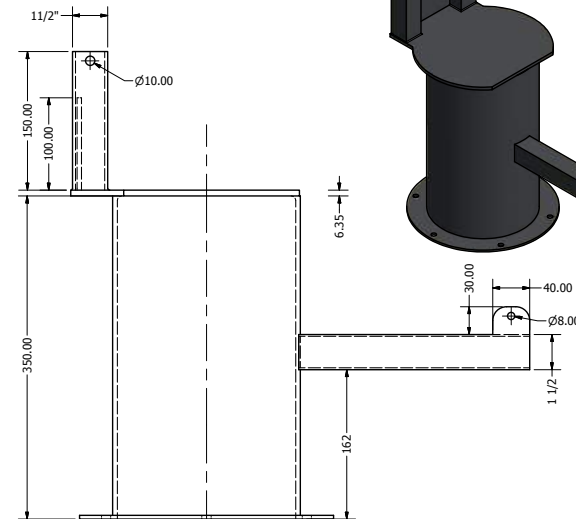
RI-ACP-001 V2.ipt
SCALE 1 : 2



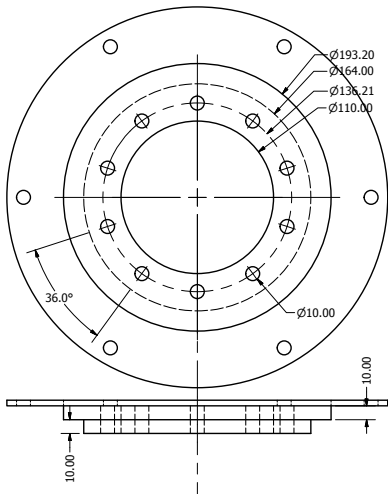
RI-ACP-001 V2.ipt
SCALE 1 / 2



SECTION C-C
SCALE 1 / 2

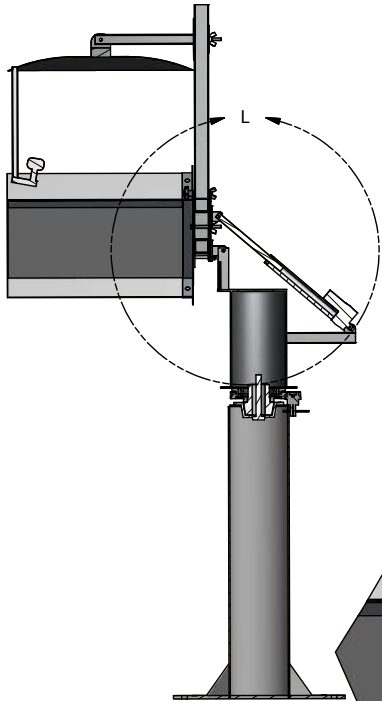


EXT-PDST-ICL
SCALE 1 : 5

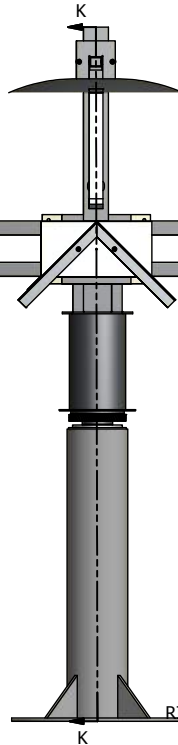
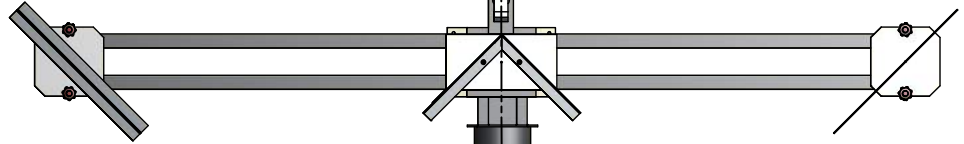


FL - CR- EXT
SCALE 1 : 2

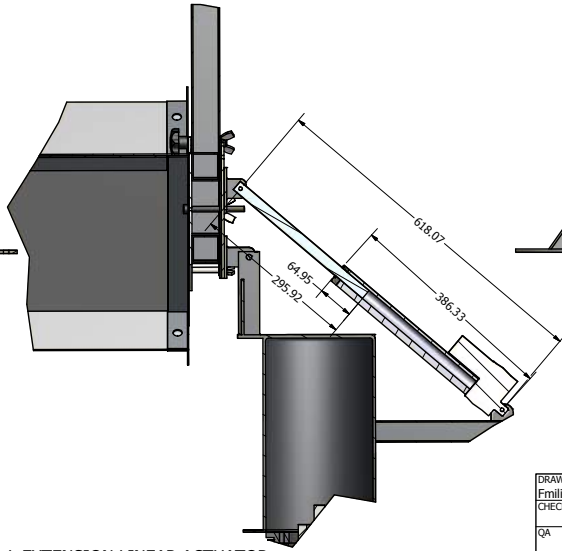
DRAWN	Fmilia Tellez	31/03/2017		
CHECKED			TITLE	
QA				
MFG				
APPROVED				
			SIZE	DWG NO
			C	RI-ASM-001v2
			SCALE	REV



SECTION K-K
SCALE 1 : 10



RI-ASM-001 (EXT)
SCALE 1 : 10



DETAIL L EXTENSION LINEAR ACTUATOR
SCALE 1 : 5

DRAWN	Fmilia Tellez	31/03/2017		
CHECKED			TITLE	
QA				
MFG				
APPROVED				
			SIZE	DWG NO
			C	RI-ASM-001v2
			SCALE	REV

B. Anexo: *Software* desarrollado

A continuación se presentan por secciones las rutinas, códigos y software desarrollado.

B.1. Código de Arduino para rotación motor de paso

El siguiente código fue desarrollado para controlar un microprocesador Arduino Uno. Se puede consultar en el repositorio de GitHub. <https://github.com/IMFR11Ghz>. Código [Stepmotor01.ino](#)

```
int pp=1;
int pp1=1;
int jj=10;
//variable de tiempo manejar entre 10-71
//10 lo mas rapido y 71 es lo mas lento
int motorPin1 = 8; // PIN-es del Motor
int motorPin2 = 9;
int motorPin3 = 10;
int motorPin4 = 11;
int boton = 13;
int boton1 = 12;
```

```
int buttonState = 0;
int buttonState1 = 0;
void setup() {

    pinMode(motorPin1, OUTPUT); // Configuración de los PIN-es como salida digital
    pinMode(motorPin2, OUTPUT);
    pinMode(motorPin3, OUTPUT);
    pinMode(motorPin4, OUTPUT);
    pinMode(boton, INPUT);
    pinMode(boton1, INPUT);

}

void loop() {
    buttonState = digitalRead(boton);
    buttonState1 = digitalRead(boton1);
    if(buttonState==HIGH){

        if(pp==1){
            digitalWrite(motorPin1, HIGH); // Primer paso
            digitalWrite(motorPin2,LOW);
            digitalWrite(motorPin3, HIGH);
            digitalWrite(motorPin4, LOW);
            delay(70);
```

B.1 Código de Arduino para rotación motor de paso

```
digitalWrite(motorPin1, HIGH); // Segundo paso
digitalWrite(motorPin2, LOW);
digitalWrite(motorPin3, LOW);
digitalWrite(motorPin4, HIGH);
delay(60);

digitalWrite(motorPin1, LOW); // Tercer paso
digitalWrite(motorPin2, HIGH);
digitalWrite(motorPin3, LOW);
digitalWrite(motorPin4, HIGH);
delay(50);

digitalWrite(motorPin1, LOW); // Cuarto paso
digitalWrite(motorPin2, HIGH);
digitalWrite(motorPin3, HIGH);
digitalWrite(motorPin4, LOW);
delay(40);
pp=8;}

digitalWrite(motorPin1, HIGH); // Primer paso
digitalWrite(motorPin2,LOW);
digitalWrite(motorPin3, HIGH);
digitalWrite(motorPin4, LOW);
delay(jj);

digitalWrite(motorPin1, HIGH); // Segundo paso
digitalWrite(motorPin2, LOW);
digitalWrite(motorPin3, LOW);
digitalWrite(motorPin4, HIGH);
```

```
delay(jj);
digitalWrite(motorPin1, LOW); // Tercer paso
digitalWrite(motorPin2, HIGH);
digitalWrite(motorPin3, LOW);
digitalWrite(motorPin4, HIGH);
delay(jj);
digitalWrite(motorPin1, LOW); // Cuarto paso
digitalWrite(motorPin2, HIGH);
digitalWrite(motorPin3, HIGH);
digitalWrite(motorPin4, LOW);
delay(jj);
}
if(buttonState==LOW){
    pp=1;
}
if(buttonState1==LOW){
    pp1=1;
}
if(buttonState1==HIGH){

    if(pp1==1){
        digitalWrite(motorPin1, HIGH); // Primer paso
digitalWrite(motorPin2,LOW);
digitalWrite(motorPin3, LOW);
digitalWrite(motorPin4, HIGH);
```

B.1 Código de Arduino para rotación motor de paso

```
delay(70);

digitalWrite(motorPin1, HIGH); // Segundo paso
digitalWrite(motorPin2, LOW);
digitalWrite(motorPin3, HIGH);
digitalWrite(motorPin4, LOW);

delay(60);

digitalWrite(motorPin1, LOW); // Tercer paso
digitalWrite(motorPin2, HIGH);
digitalWrite(motorPin3, HIGH);
digitalWrite(motorPin4, LOW);

delay(50);

digitalWrite(motorPin1, LOW); // Cuarto paso
digitalWrite(motorPin2, HIGH);
digitalWrite(motorPin3, LOW);
digitalWrite(motorPin4, HIGH);

delay(40);
pp1=9;}

digitalWrite(motorPin1, HIGH); // Primer paso
digitalWrite(motorPin2,LOW);
digitalWrite(motorPin3, LOW);
digitalWrite(motorPin4, HIGH);

delay(jj);

digitalWrite(motorPin1, HIGH); // Segundo paso
digitalWrite(motorPin2, LOW);
digitalWrite(motorPin3, HIGH);
```

```
digitalWrite(motorPin4, LOW);  
    delay(jj);  
digitalWrite(motorPin1, LOW); // Tercer paso  
digitalWrite(motorPin2, HIGH);  
digitalWrite(motorPin3, HIGH);  
digitalWrite(motorPin4, LOW);  
    delay(jj);  
digitalWrite(motorPin1, LOW); // Cuarto paso  
digitalWrite(motorPin2, HIGH);  
digitalWrite(motorPin3, LOW);  
digitalWrite(motorPin4, HIGH);  
    delay(jj);  
}  
}
```

B.2. Código de muestreo entre ESP32S y ADC-16bit

Este código permite la conversión análoga a digital, se instala en el microprocesador ESP32S. Puede ser consultada en el repositorio de GitHub. <https://github.com/IMFR11Ghz>. Código [main.cpp](#)

IMFR11Ghz / imfr-hal

Branch: **master** ▾

imfr-hal / [adc_telescope](#) / [src](#) / **main.cpp**



tucanae47 too much changes to merge fast updating master here

1 contributor

135 lines (109 sloc) 2.4 KB

```
1
2  #include <Arduino.h>
3  #include <Adafruit_ADS1015.h>
4  #include <time.h>
5  #include <ctime>
6
7  long lastMsg = 0;
8  char msg[75];
9  int value = 0;
10 time_t now_time;
11 long now_millis;
12 long now_s;
13 const int DIR = 32;
14 const int STEP = 33;
15
16
17 int stop = 0;
18 int rotate = 360;
19 float voltage = 0.0;
20 int16_t adc0;
21
22 const double accuG23= 0.1875; //G2/3
23 const double accuG1= 0.125; //G1
24 const double accuG2= 0.0625; //G2
25 const double accuG4= 0.03125; //G4
26 const double accuG8= 0.015625; //G8
```

```
27     const double accuG16= 0.0078125;//G16
28
29     const double sampling_rate = 5.0;
30     double average_voltage =0;
31
32     int nsamples =0;
33     int ns =0;
34     float cur_v =0.0;
35
36     const long DELTA50 = 20;
37     const long DELTA10 = 100;
38     const long DELTA1 = 1000;
39     const long DELTA2 = 1000;
40     const long DELTA_3 = 333;
41     const long DELTA_500 = 2;
42     const long DELTA20 = 50;
43     const long DELTA_1000 = 0.5;
44
45     Adafruit_ADS1115 ads;
46
47     long delta=DELTA_500;
48     const int gain=0;
49     double accuracy;
50
51
52     float ads_read(void){
53         const float v = ads.readADC_SingleEnded_V(0) ;
54         return v;
55     }
56
57     void setup_ads(){
58
59         ads.begin();
60         switch (gain){
61             case 0:
62                 accuracy=accuG23;
63                 ads.setGain(GAIN_TWOTHIRDS);
64                 break;
```

```

65         case 1:
66             accuracy=accuG1;
67             ads.setGain(GAIN_ONE);
68         break;
69         case 2:
70             accuracy=accuG2;
71             ads.setGain(GAIN_TWO);
72         break;
73         case 3:
74             accuracy=accuG4;
75             ads.setGain(GAIN_FOUR);
76         break;
77         case 4:
78             accuracy=accuG8;
79             ads.setGain(GAIN_EIGHT);
80         break;
81         case 5:
82             accuracy=accuG16;
83             ads.setGain(GAIN_SIXTEEN);
84         break;
85     }
86
87     ads.setSPS(ADS1115_DR_860SPS);           // 128SPS (default)
88     ads.waitForConversion();
89 }
90
91 void setup() {
92
93     Serial.begin(115200);
94     setup_ads();
95     now_millis = millis();
96 }
97
98
99 void samples_per_second(){
100     long cur_millis = millis();
101     if(now_s + 1000 <= cur_millis ){
102         now_s = millis();

```

```
103     Serial.print("samples per second "); Serial.println(ns);
104     ns = 0;
105
106     }
107 }
108
109 void loopGraph(void){
110     long cur_millis = millis();
111     if(now_millis + delta <= cur_millis ){
112         cur_v= ads_read();
113         Serial.println(cur_v);
114         now_millis = millis();
115     }
116 }
117
118 void loopGraphAcu(void){
119     long cur_millis = millis();
120     if(now_millis + delta <= cur_millis ){
121         cur_v= ads_read();
122         double time_secs = (now_millis / 1000.0);
123         Serial.print(time_secs); Serial.print(" "); Serial.print(" ");
124
125         now_millis = millis();
126         ns+=1;
127     }
128 }
129
130
131 void loop(void) {
132     //samples_per_second();
133     loopGraphAcu();
134 }
```

B.3. *Script* de visualizacion y captura de datos

A continuación una serie de *scripts* anidados que posibilitan la captura de datos del puerto USB del computador portatil, los datos provienen del gabinete de manejo de señal. Pueden ser consultados en el repositorio de GitHub. <https://github.com/IMFR11Ghz>. Los archivos son [Visualizacion.sh](#), [openport.sh](#), [rwfile.sh](#), [plot.sh](#).

B.3.1. Visualizacion.sh

```
#!/bin/bash

#do

gnome-terminal -e ./openport.sh

gnome-terminal -e ./rwfile.sh

gnome-terminal -e ./plot.sh

#done
```

B.3.2. openport.sh

```
#!/bin/bash

var=0

cd /home/alfazoom/imfr-hal/python

#0. READ SERIAL DATA

picocom -b 115200 /dev/ttyUSB0
```

B.3.3. `rwfile.sh`

```
#!/bin/bash

cd /home/alfazoom/imfr-hal/python

#1. READ SERIAL AND REDIRECT TO FILE:

echo "" > radio_sun.log && cat /dev/ttyUSB0 | tee radio_sun.log0
```

B.3.4. `plot.sh`

```
#!/bin/bash

cd /home/alfazoom/imfr-hal/python

#2. GRAPH

cat radio_sun.log | ./plot_evolution.pl
```

B.4. Rutina en *Jupyter Notebook Python* para análisis de datos

Puede ser consultada en el repositorio de GitHub. <https://github.com/IMFR11Ghz>

```
In [1]: import numpy as np
import pylab as pl
import math
import matplotlib as mpl
from matplotlib.ticker import MultipleLocator
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.cbook as cbook
import serial
```

```
In [2]: from IPython.display import Image
Image(filename='/home/alfazoom/imfr-hal/vpython/IMFR11GHz/Loadotipo IMFR11GHz.on
```

Out[2]:



RADIO TELESCOPE INTERFEROMETER IMFR11GHz

```
In [3]: # Velocidad de la Luz [m/s]
C = 299792458
# Frecuencia [Hz]
nu = 1.10e+10
# Longitud de Onda [mm]
Lambda = (C/nu)*1000
Lambda
```

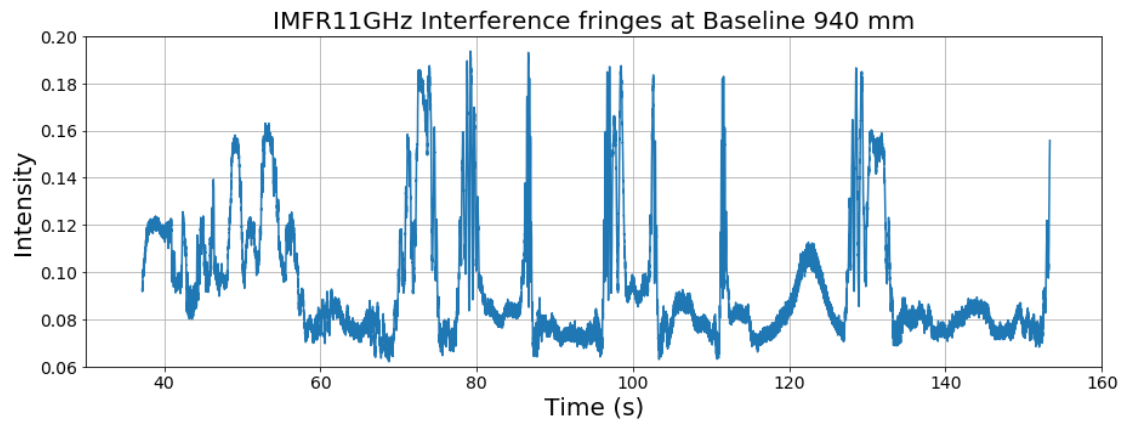
Out[3]: 27.25385981818182

```
In [4]: B = np.array([940, 1100, 1200, 1300, 1400, 1500, 1600, 1700, 1800, 1900, 2000,
#print B
B_lambda = B / Lambda
print B_lambda
```

```
[ 34.49052744  40.36125552  44.03046057  47.69966561  51.36887066
 55.03807571  58.70728075  62.3764858   66.04569085  69.7148959
 73.38410094  77.05330599  80.72251104  84.39171609  88.06092113
 91.73012618  95.39933123  99.06853627 102.73774132 106.40694637]
```

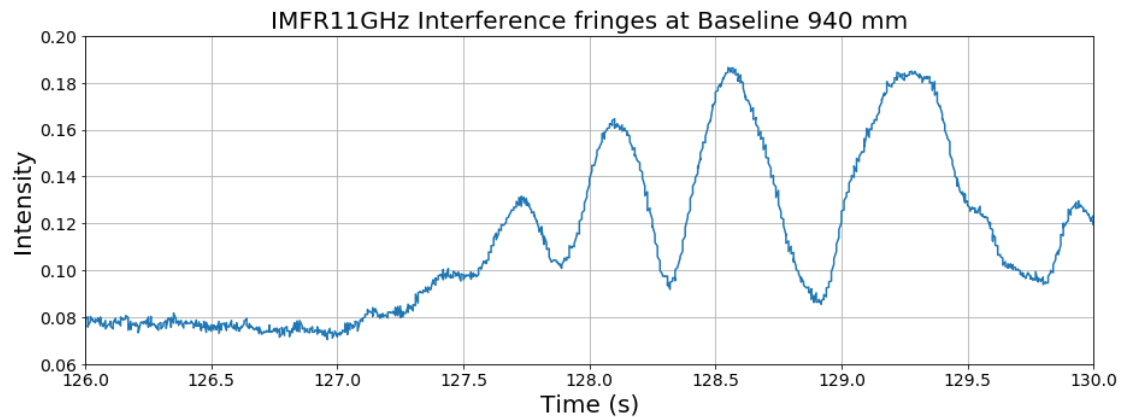
```
In [5]: data1=np.loadtxt('/home/alfazoom/imfr-hal/python/Sesion24.08.2018/IMFR11GHz-24
mpl.rcParams['figure.figsize'] = [15, 5]

fig = plt.plot(data1[:,0],data1[:,1]*-1,'none', linewidth=1.5, color='#1f77b4'
pl.xlim(30,160)
plt.xticks(fontsize=14, rotation=0)
plt.ylim((0.06,0.20))
plt.yticks(fontsize=14, rotation=0)
plt.title('IMFR11GHz Interference fringes at Baseline 940 mm', size=20)
plt.xlabel('Time (s)', size=20)
plt.ylabel('Intensity', size=20)
plt.grid(True)
#filename = '/home/alfazoom/imfr-hal/python/Sesion24.08.2018/IMFR11GHz-24.08.2
#plt.savefig(filename, dpi = 300)
plt.show()
```



```
In [26]: data=np.loadtxt('/home/alfazoom/imfr-hal/python/Sesion24.08.2018/IMFR11GHz-24
mpl.rcParams['figure.figsize'] = [15, 5]

figg = plt.plot(data[:,0],data[:,1]*-1,'none', linewidth=1.5, color='#1f77b4
pl.xlim(126,130)
plt.xticks(fontsize=14, rotation=0)
plt.ylim((0.06,0.20))
plt.yticks(fontsize=14, rotation=0)
plt.title('IMFR11GHz Interference fringes at Baseline 940 mm', size=20)
plt.xlabel('Time (s)', size=20)
plt.ylabel('Intensity', size=20)
plt.grid(True)
#filename = '/home/alfazoom/imfr-hal/python/Sesion24.08.2018/IMFR11GHz-24.08.2
#plt.savefig(filename, dpi = 300)
plt.show()
```



```
In [7]: #Sample_1 at 111.5 segundos
B940_Pmax_1 = 0.182999998
B940_Pmin_1 = 0.088875003
B940_Vo1 = (B940_Pmax_1-B940_Pmin_1)/(B940_Pmax_1+B940_Pmin_1)

#Sample_2 at 86 segundos
B940_Pmax_2 = 0.193124995
B940_Pmin_2 = 0.085124999
B940_Vo2 = (B940_Pmax_2-B940_Pmin_2)/(B940_Pmax_2+B940_Pmin_2)

#Sample_3 at 128.5 segundos
B940_Pmax_3 = 0.186562508
B940_Pmin_3 = 0.085500002
B940_Vo3 = (B940_Pmax_3-B940_Pmin_3)/(B940_Pmax_3+B940_Pmin_3)

print("Visibilidad B940_vo1 =",B940_Vo1)
print("Visibilidad B940_vo2 =",B940_Vo2)
print("Visibilidad B940_vo3 =",B940_Vo3)

#Valor Promedio
B940_Vo = (B940_Vo1+B940_Vo2+B940_Vo3)/3
print("Visibilidad B940_Vo =",B940_Vo)
print("ok Baseline 940mm")

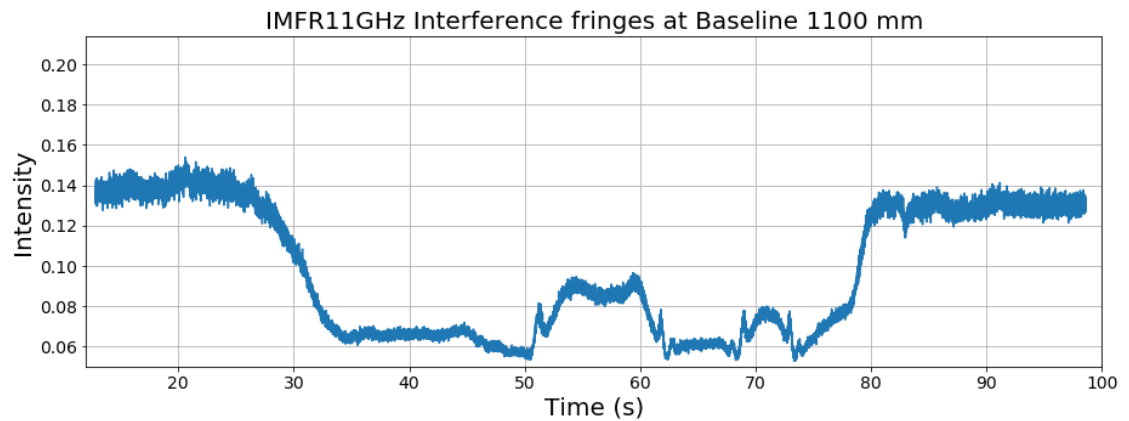
('Visibilidad B940_vo1 =', 0.34620687688751495)
('Visibilidad B940_vo2 =', 0.3881401557191048)
('Visibilidad B940_vo3 =', 0.37146796153575146)
('Visibilidad B940_Vo =', 0.36860499804745706)
ok Baseline 940mm
```

```
In [8]: sigma_940=math.sqrt((((B940_Vo1-B940_Vo)**2+(B940_Vo2-B940_Vo)**2+(B940_Vo3-B940_Vo)**2))**.5)
sigma_940
```

```
Out[8]: 0.021112730480528703
```

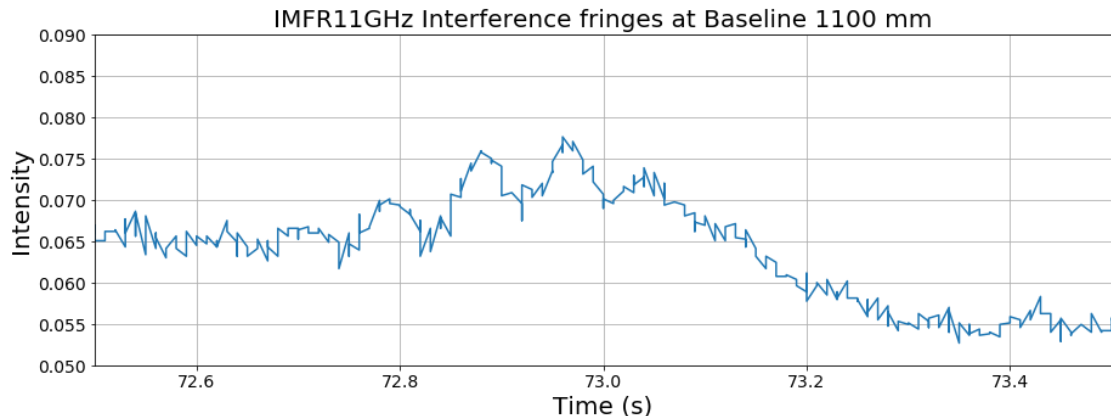
```
In [10]: data1=np.loadtxt('/home/alfazoom/imfr-hal/python/Sesion24.08.2018/IMFR11GHz-24.08.2018.txt')
mpl.rcParams['figure.figsize'] = [15, 5]
plt.grid(True)
```

```
plt.plot(data1[:,0],data1[:,1]*-1,'none', linewidth=1.5, color='#1f77b4',)
plt.xlim(12,100)
plt.xticks(fontsize=14, rotation=0)
plt.ylim((0.05,0.214))
plt.yticks(fontsize=14, rotation=0)
plt.title('IMFR11GHz Interference fringes at Baseline 1100 mm', size=20)
plt.xlabel('Time (s)', size=20)
plt.ylabel('Intensity', size=20)
plt.grid(True)
#filename = '/home/alfazoom/imfr-hal/python/Sesion24.08.2018/IMFR11GHz-24.08.2018.png'
#plt.savefig(filename, dpi = 300)
plt.show()
```



```
In [11]: data=np.loadtxt('/home/alfazoom/imfr-hal/python/Sesion24.08.2018/IMFR11GHz-24
mpl.rcParams['figure.figsize'] = [15, 5]
plt.grid(True)

plt.plot(data[:,0],data[:,1]*-1,'none', linewidth=1.5, color='#1f77b4',)
pl.xlim(72.5,73.5)
plt.xticks(fontsize=14, rotation=0)
plt.ylim((0.05,0.09))
plt.yticks(fontsize=14, rotation=0)
plt.title('IMFR11GHz Interference fringes at Baseline 1100 mm', size=20)
plt.xlabel('Time (s)', size=20)
plt.ylabel('Intensity', size=20)
plt.grid(True)
#filename = '/home/alfazoom/imfr-hal/python/Sesion24.08.2018/IMFR11GHz-24.08.2
#plt.savefig(filename, dpi = 300)
plt.show()
```



```
In [13]: #Sample_1 at 69 segundos
B1100_Pmax_1 = 0.0778125
B1100_Pmin_1 = 0.064125001
B1100_Vo1 = (B1100_Pmax_1-B1100_Pmin_1)/(B1100_Pmax_1+B1100_Pmin_1)

#Sample_2 at 51.3 segundos
B1100_Pmax_2 = 0.081187502
B1100_Pmin_2 = 0.066375002
B1100_Vo2 = (B1100_Pmax_2-B1100_Pmin_2)/(B1100_Pmax_2+B1100_Pmin_2)

#Sample_3 at 73 segundos
B1100_Pmax_3 = 0.077624999
B1100_Pmin_3 = 0.067500003
B1100_Vo3 = (B1100_Pmax_3-B1100_Pmin_3)/(B1100_Pmax_3+B1100_Pmin_3)

print("Visibilidad B1100_vo1 =",B1100_Vo1)
print("Visibilidad B1100_vo2 =",B1100_Vo2)
print("Visibilidad B1100_vo3 =",B1100_Vo3)

#Valor Promedio
B1100_Vo = (B1100_Vo1+B1100_Vo2+B1100_Vo3)/3
print("Visibilidad B1100_Vo =",B1100_Vo)
print("ok Baseline 1100mm")

('Visibilidad B1100_vo1 =', 0.0964332815751068)
('Visibilidad B1100_vo2 =', 0.10038119168809981)
('Visibilidad B1100_vo3 =', 0.06976741333653864)
('Visibilidad B1100_Vo =', 0.08886062886658175)
ok Baseline 1100mm
```

```
In [121]: sigma_3000=math.sqrt((((B3000_Vo1-B3000_Vo)**2+(B3000_Vo2-B3000_Vo)**2+(B3000
sigma_3000
-----
NameError                                Traceback (most recent call last)
<ipython-input-121-c21247028c20> in <module>()
----> 1 sigma_3000=math.sqrt((((B3000_Vo1-B3000_Vo)**2+(B3000_Vo2-B3000_Vo)*
*2+(B3000_Vo3-B3000_Vo)**2))/2)
      2 sigma_3000

NameError: name 'B3000_Vo1' is not defined
```

VISIBILIDAD vs B_lambda

```
In [122]: B_lambda
Out[122]: array([ 34.49052744,  40.36125552,  44.03046057,  47.69966561,
                51.36887066,  55.03807571,  58.70728075,  62.3764858 ,
                66.04569085,  69.7148959 ,  73.38410094,  77.05330599,
                80.72251104,  84.39171609,  88.06092113,  91.73012618,
                95.39933123,  99.06853627, 102.73774132, 106.40694637])

In [123]: Vo_data = np.array([B940_Vo, B1100_Vo, B1200_Vo, B1300_Vo, B1400_Vo, B1500_Vo,
Vo data
Out[124]: array([ 0.368605 ,  0.08886063,  0.1257296 ,  0.13706351,  0.13841709,
                0.07988033,  0.1013021 ,  0.08764209,  0.08687657,  0.09954781,
                0.0775028 ,  0.07291357,  0.06598674,  0.04828161,  0.06267754,
                0.04873247,  0.04644494,  0.04525279,  0.05983318,  0.04737642])

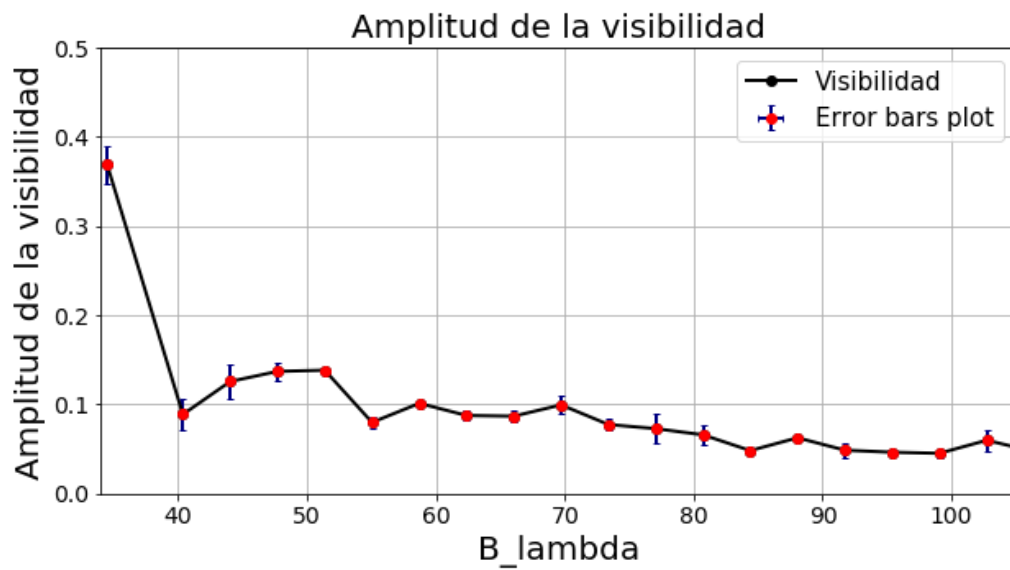
In [125]: Err_data = np.array([sigma_940, sigma_1100, sigma_1200, sigma_1300, sigma_1400
Err_data
Out[125]: array([ 0.02111273,  0.01665262,  0.01999404,  0.0103446 ,  0.00363406,
                0.00579886,  0.00148152,  0.00612348,  0.00715608,  0.00968632,
                0.00651148,  0.01615354,  0.01126467,  0.00243018,  0.00240399,
                0.0079258 ,  0.00251378,  0.00487177,  0.01224218,  0.00442455])
```

```

In [127]: plt.plot(B_lambda, Vo_data, marker='o', color='black', linewidth=2, linestyle=
mpl.rcParams['figure.figsize'] = [10, 5]
plt.errorbar([B_lambda], [Vo_data], xerr=0, yerr=[Err_data],fmt='o', color='re
ecolor='navy', elinewidth=2, capsize=2, label="Error bars plot")
plt.legend(loc=('upper right'),fontsize=15)
plt.xlim(34,105)
plt.xticks(fontsize=14, rotation=0)
plt.ylim((0,0.5))
plt.yticks(fontsize=14, rotation=0)

plt.title('Amplitud de la visibilidad', size=20)
plt.xlabel('B_lambda', size=20)
plt.ylabel('Amplitud de la visibilidad', size=20)
plt.grid(True)
filename = '/home/alfazoom/imfr-hal/python/Sesion24.08.2018/IMFR11GHz-24.08.20
plt.savefig(filename, dpi = 300)
plt.grid(True)
plt.show()

```



In []:

B.5. Rutina en *Jupyter Notebook Python* para ajuste funcion *Sinc*

Puede ser consultada en el repositorio de GitHub. <https://github.com/IMFR11Ghz>

```
In [66]: import pandas as pd
import numpy as np
import scipy as scipy
from scipy import stats
from scipy import optimize
from scipy.stats import chisquare
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib as mpl
import pylab as pl
import math
```

```
In [67]: from IPython.display import Image
Image(filename='/home/alfazoom/imfr-hal/python/IMFR11GHz/Logo_tipo_IMFR11GHz.d
```

Out[67]:



RADIO TELESCOPE
INTERFEROMETER
IMFR11GHz

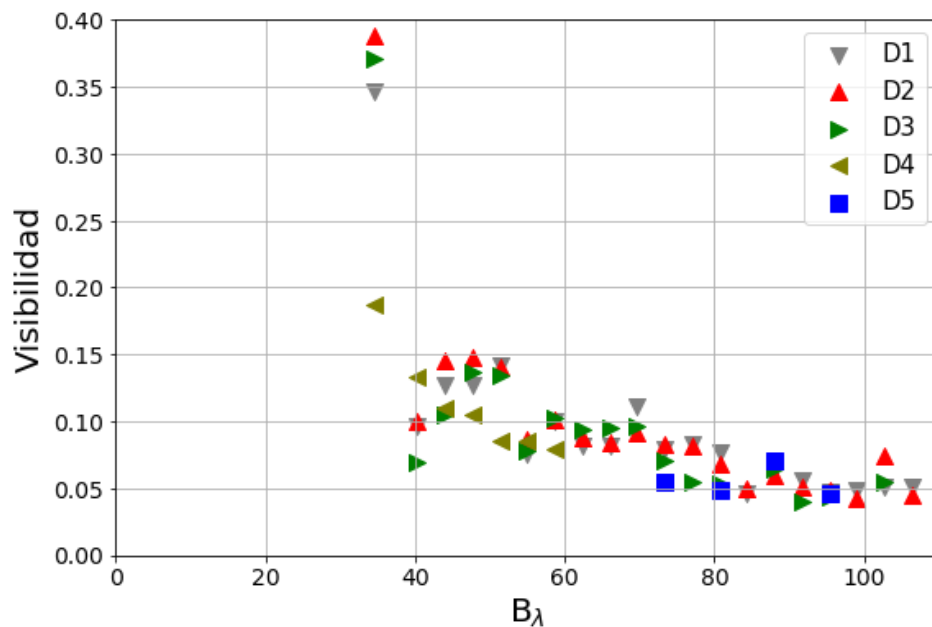
Lectura de los datos

```
In [68]: Data = pd.read_csv('/home/alfazoom/imfr-hal/python/IMFR11GHz/Data_IMFR11GHz_t
Data_full = pd.read_csv('/home/alfazoom/imfr-hal/python/IMFR11GHz/Data_IMFR11
```

```

In [69]: plt.figure(figsize=(9, 6))
plt.scatter(Data['B_lambda'], Data['D1c3'], marker='v', s=100, color='grey', l
plt.scatter(Data['B_lambda'], Data['D2c4'], marker='^', s=100, color='red', l
plt.scatter(Data['B_lambda'], Data['D3c5'], marker='>', s=100, color='green', l
plt.scatter(Data['B_lambda'], Data['D4c6'], marker='<', s=100, color='olive', l
plt.scatter(Data['B_lambda'], Data['D5c7'], marker='s', s=100, color='blue', l
#plt.title("Data IMFR11GHz")
plt.xlabel("B_\lambda", size=20)
plt.ylabel("Visibilidad", size=20)
plt.ylim((0,0.4))
plt.xlim((0.0,110))
plt.xticks(fontsize=14, rotation=0)
plt.yticks(fontsize=14, rotation=0)
plt.legend(loc='best', fontsize=15)
plt.grid(True)
filename = '/home/alfazoom/imfr-hal/python/IMFR11GHz/IMFR11GHz-full_data.png'
plt.savefig(filename, dpi = 300)
plt.show()

```



Definición de la función Sinc normalizada y obtención de parámetros

```

In [142]: def test_func(x,A,B):
           return (A*(np.sin(B*np.pi*x))/(B*np.pi*x))

```

```

In [143]: params, params_covariance = optimize.curve_fit(test_func, Data_full['B_lambda

```

```

In [144]: params[0].params[1]

```

```

Out[144]: (0.19131334518548782, 0.008755417260552761)

```

Error de los parametros y cálculo de r^2 de ajuste

```
In [145]: perr = np.sqrt(np.diag(params_covariance))  
perr
```

```
Out[145]: array([0.01622833, 0.00051134])
```

```
In [146]: A=params[0]  
A
```

```
Out[146]: 0.19131334518548782
```

```
In [147]: B=params[1]  
B
```

```
Out[147]: 0.008755417260552761
```

```
In [148]: Exp_val=scipy.array(A*(np.sin(B*np.pi*(Data_full['B_lambda'])))/(B*np.pi*(Data  
len(Exp_val)
```

```
Out[148]: 68
```

```
In [149]: Obs_val=scipy.array(Data_full['fulldata'])  
len(Obs_val)
```

```
Out[149]: 68
```

```
In [150]: residuals = Obs_val - Exp_val  
#residuals
```

```
In [151]: ss_res = np.sum(residuals**2)
```

```
In [152]: ss_tot = np.sum((Obs_val - np.mean(Obs_val))**2)
```

```
In [153]: r_squared = 1 - (ss_res / ss_tot)  
r_squared
```

```
Out[153]: 0.42122809996139954
```

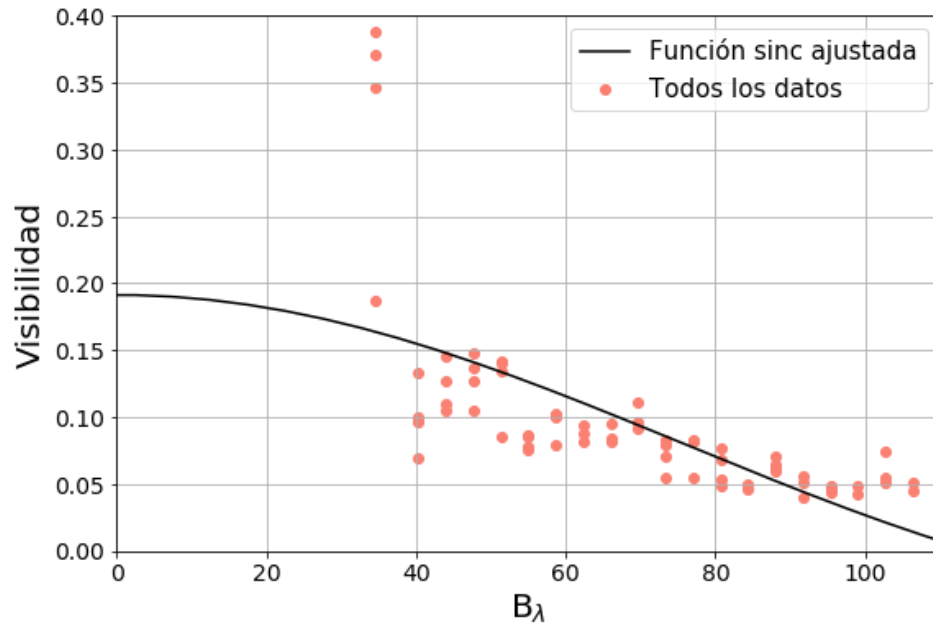
Obtención del primer cero de la función Sinc ajustada a los datos

```
In [82]: xd1= np.linspace(-1000, 1000, 400)
```

```

In [83]: plt.figure(figsize=(9, 6))
plt.scatter(Data_full['B_lambda'], Data_full['fulldata'], marker='o', color='
plt.plot(xd1, test_func(xd1,params[0],params[1]),label='Función sinc ajustada
#plt.title("Data IMFR11GHz")
plt.xlabel("B$_\lambda$", size=20)
plt.ylabel("Visibilidad", size=20)
plt.ylim((0,0.4))
plt.xlim((0,110))
plt.xticks(fontsize=14, rotation=0)
plt.yticks(fontsize=14, rotation=0)
plt.legend(loc='best', fontsize=15)
plt.grid(True)
filename = '/home/alfazoom/imfr-hal/python/IMFR11GHz/IMFR11GHz-fitted_func.pn
plt.savefig(filename, dpi = 300)
plt.show()

```



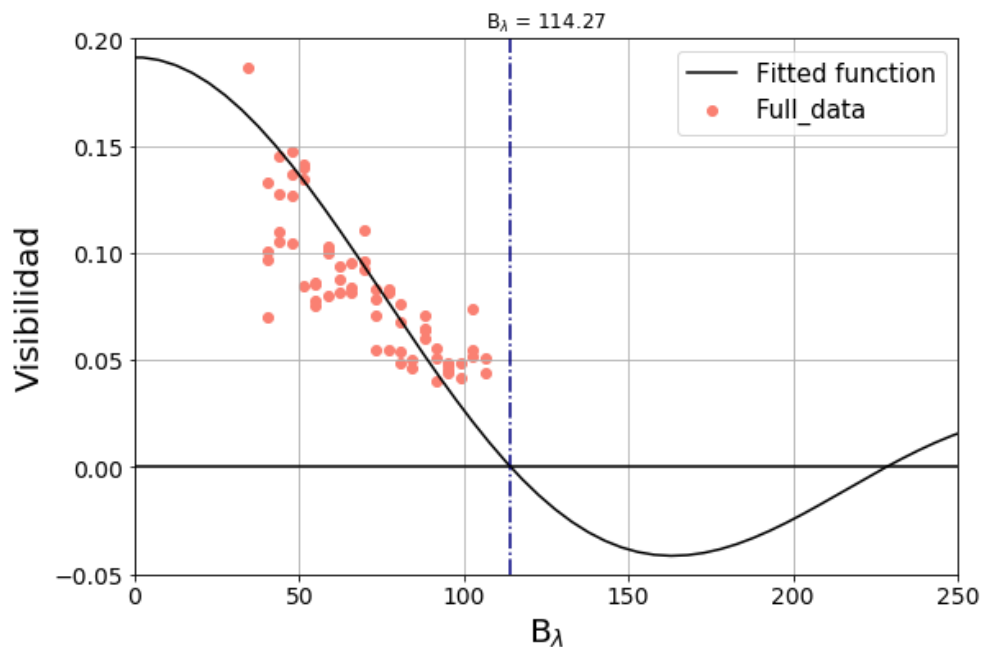
```

In [84]: plt.figure(figsize=(9, 6))
#plt.scatter(Data['B_lambda'], Data['D2c4'], marker='^', color='red', label='
plt.scatter(Data_full['B_lambda'], Data_full['fulldata'], marker='o', color='
plt.plot(xd1, test_func(xd1,params[0],params[1]),label='Función sinc ajustada
#plt.title("B$_\lambda$ = 114.27")
plt.xlabel("B$_\lambda$", size=20)
plt.ylabel("Visibilidad", size=20)
plt.ylim((-0.1,0.4))
plt.xlim((-1000.0,1000.0))
plt.xticks(fontsize=14, rotation=0)
plt.yticks(fontsize=14, rotation=0)
plt.axvline(117, linestyle='-.',color='navy', label='B$_\lambda$ = 114.27')
plt.axhline(0.0, linestyle='-',color='black')
plt.legend(loc='best',fontsize=12)
plt.grid(True)
filename = '/home/alfazoom/imfr-hal/python/IMFR11GHz/IMFR11GHz-sinc-fulldata.
plt.savefig(filename, dpi = 300)
plt.show()

```



```
In [85]: plt.figure(figsize=(9, 6))
#plt.scatter(Data['B_lambda'], Data['D2c4'], marker='^', color='red', label='
plt.scatter(Data_full['B_lambda'], Data_full['fulldata'], marker='o', color='
plt.plot(xd1, test_func(xd1,params[0],params[1]),label='Fitted function', col
plt.title("B$_\lambda$ = 114.27")
plt.ylabel("Visibilidad", size=20)
plt.ylim((-0.05,0.2))
plt.xlim((0.0,250.0))
#plt.ylim((-0.015,0.015))
#plt.xlim((110.0,118.0))
plt.axvline(114.27, linestyle='-.',color='navy')
#plt.axvline(90, linestyle='-.',color='blue')
plt.axhline(0.0, linestyle='-',color='black')
plt.xlabel('B$_\lambda$', size=20)
plt.xticks(fontsize=14, rotation=0)
plt.yticks(fontsize=14, rotation=0)
plt.legend(loc='best',fontsize=15)
plt.grid(True)
#filename = '/home/alfazoom/imfr-hal/python/IMFR11GHz/IMFR11GHz-sinc_null.png
#plt.savefig(filename, dpi = 300)
plt.show()
```



Visualización del error a 1-sigma

```
In [86]: perr = np.sqrt(np.diag(params_covariance))
perr
```

```
Out[86]: array([0.01622833, 0.00051134])
```

```
In [154]: print("A =", params[0], "+/-", params_covariance[0,0]**0.5)
print("A =", params[1], "+/-", params_covariance[1,1]**0.5)
```

```
A = 0.19131334518548782 +/- 0.01622833075604083
A = 0.008755417260552761 +/- 0.0005113442204963597
```

```
In [88]: xd=np.array([34.49052744,40.36125552,44.03046057,47.69966561,51.36887066,55.0
```

```
In [89]: yd=np.array([0.3231619245, 0.0997980899, 0.1217490035, 0.1289921024, 0.125013
```

```
In [90]: nstd = 1. # to draw 5-sigma intervals
params_up = params + nstd * perr
params_dw = params - nstd * perr

fit = test_func(xd, *params)
fit_up = test_func(xd, *params_up)
fit_dw = test_func(xd, *params_dw)
```

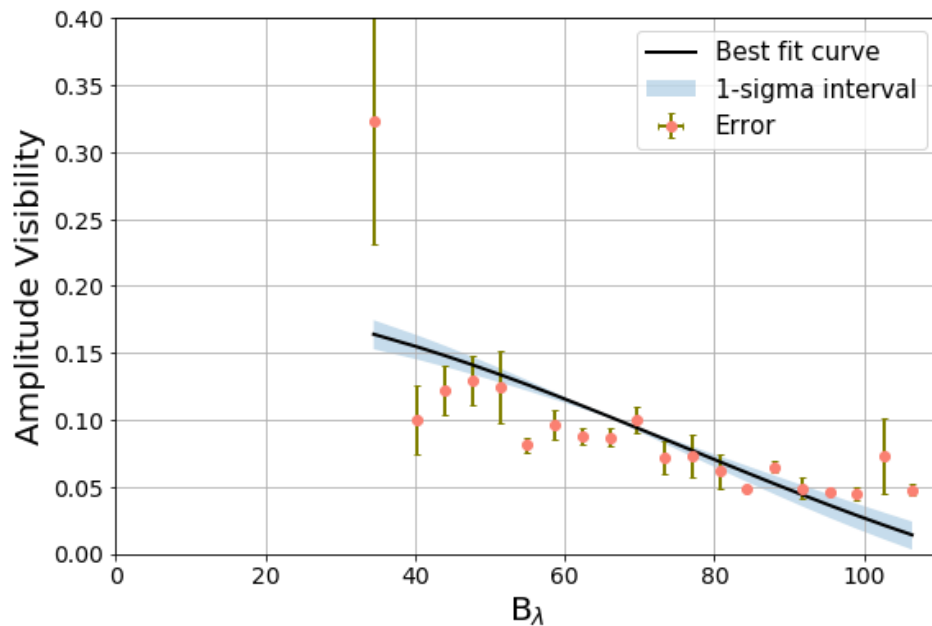
```
In [91]: Err=np.array([0.0925065222, 0.0257562677, 0.0181628275, 0.0182189791, 0.02697
Err
```

```
Out[91]: array([0.09250652, 0.02575627, 0.01816283, 0.01821898, 0.02697091,
0.00536016, 0.01088111, 0.00612348, 0.00715608, 0.00968632,
0.01269503, 0.01615354, 0.01278017, 0.00243018, 0.00462681,
0.0079258 , 0.00208376, 0.00487177, 0.02853224, 0.00442455])
```

```

In [92]: #plt.figure(figsize=(12, 8))
fig, ax = plt.subplots(1, figsize=(9, 6))
#plt.scatter(Data_full['B_lambda'], Data_full['fulldata'], label='Data Visibi
#plt.plot(xd, test_func(xd,params[0],params[1]),label='Sinc Fitted function',
plt.errorbar([xd], [yd], xerr=0, yerr=[Err], fmt='o', color='salmon', ecolor=
plt.plot(xd, fit, 'black', lw=2, label='Best fit curve')
ax.fill_between(xd, fit_up, fit_dw, alpha=.25, label='1-sigma interval')
plt.ylim((0,0.4))
plt.xlim((0.0,110))
#pl.axvline(96, linestyle='-.',color='grey')
#pl.axvline(95, linestyle='-.',color='grey')
#pl.axvline(95.5, linestyle='-.',color='red')
plt.xlabel('B$_\lambda$', size=20)
plt.xticks(fontsize=14, rotation=0)
plt.ylabel('Amplitude Visibility', size=20)
plt.yticks(fontsize=14, rotation=0)
plt.legend(loc='best',fontsize=15)
plt.grid(True)
filename = '/home/alfazoom/imfr-hal/python/IMFR11GHz/IMFR11GHz_error_1sigma.p
plt.savefig(filename, dpi = 300)
plt.show()

```



```
In [93]: #help(optimize.curve_fit)
```

```
In [94]: #help(scipy.stats.chisquare)
```

```
In [95]: slope, intercept, r value, p value, std err = stats.linregress(obs_val.Exp va
```

```
In [96]: >>> r value**2
```

```
Out[96]: 0.42247260467962083
```

```
In [102]: Pa_plus=params[0]+0.01622833075604083
Pa_plus
```

```
Out[102]: 0.20754167594152864
```

```
In [103]: Pb_plus=params[1]+0.0005113442204963597  
Pb_plus
```

```
Out[103]: 0.00926676148104912
```

```
In [104]: Pa_minus=params[0]-0.01622833075604083  
Pa_minus
```

```
Out[104]: 0.175085014429447
```

```
In [105]: Pb_minus=params[1]-0.0005113442204963597  
Pb_minus
```

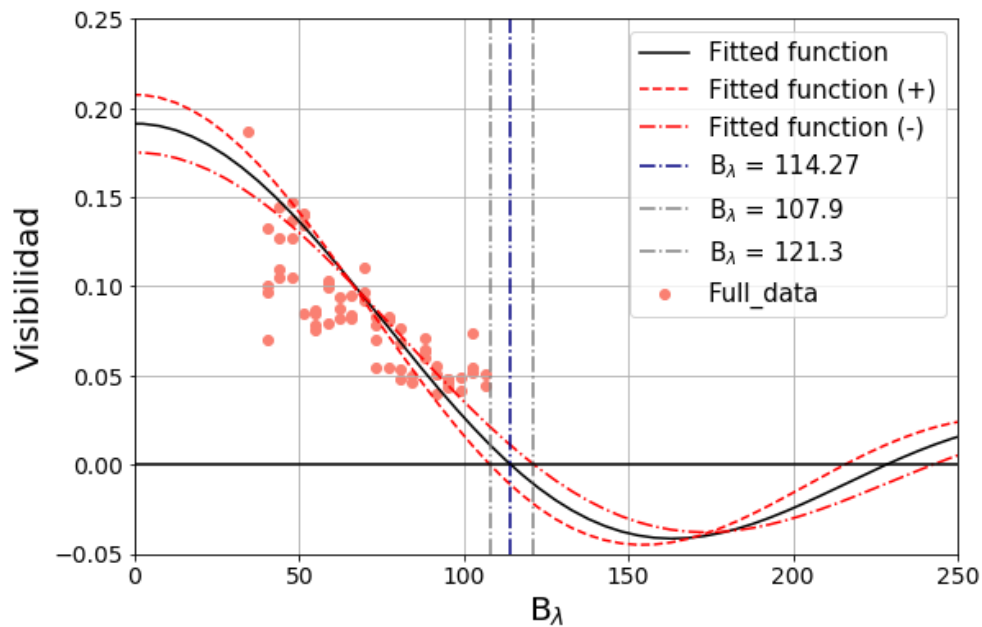
```
Out[105]: 0.008244073040056402
```

Variación de los parametros +/- para obtener el error de ajuste en la determinación del Cero (null)

```

In [156]: plt.figure(figsize=(9, 6))
#plt.scatter(Data['B_lambda'], Data['D2c4'], marker='^', color='red', label='
plt.scatter(Data_full['B_lambda'], Data_full['fulldata'], marker='o', color='
plt.plot(xd1, test_func(xd1,params[0],params[1]),label='Fitted function', col
plt.plot(xd1, test_func(xd1,Pa_plus,Pb_plus),label='Fitted function (+)', lin
plt.plot(xd1, test_func(xd1,Pa_minus,Pb_minus),label='Fitted function (-)',li
#plt.title("B$_\lambda$ = 114.27")
plt.ylabel("Visibilidad", size=20)
plt.ylim((-0.05,0.25))
plt.xlim((-0.0,250.0))
#plt.ylim((-0.03,0.03))
#plt.xlim((105.0,123.0))
plt.axvline(114.27, linestyle='-.',color='navy', label='B$_\lambda$ = 114.27')
plt.axvline(107.9, linestyle='-.',color='grey', label='B$_\lambda$ = 107.9')
plt.axvline(121.3, linestyle='-.',color='grey', label='B$_\lambda$ = 121.3')
plt.axhline(0.0, linestyle='-',color='black')
plt.xlabel('B$_\lambda$', size=20)
plt.xticks(fontsize=14, rotation=0)
plt.yticks(fontsize=14, rotation=0)
plt.legend(loc='best',fontsize=15)
plt.grid(True)
filename = '/home/alfazoom/imfr-hal/python/IMFR11GHz/IMFR11GHz-sinc_null-erro
plt.savefig(filename, dpi = 300)
plt.show()

```



In []:

C. Anexo: Laboratorios para la educación

En este anexo se plantean los laboratorios o experimentos que se pueden realizar con el reflector parabólico sencillo y el interferómetro. Los laboratorios propuestos son:

1. Laboratorio Señal del Sol_☉ con una antena paraboloide.
2. Obtención del diámetro angular del Sol_☉ con el Radio Interferómetro IMFR11GHz.
3. Construcción de una imagen 2D de una fuente extendida.

C.1. Laboratorio Señal del Sol_☉ con una antena paraboloide

Objetivo: Es recibir o sensor la intensidad del Sol_☉ mediante un radiotelescopio sencillo. Además escuchar su sonido al variar la intensidad cuando se pasa por el disco solar. El estudiante podrá identificar que es factible sensor, ver la radiación solar.

Equipo e instrumentos: Para desarrollar el laboratorio se utilizan los siguientes elementos:

1. Antena paraboloide.

2. Un sistema de recepción de Radio. SDR. Ver imagen
3. Un PC portátil que tenga instalado GQRX Radio o GNURadio
4. Goniómetro
5. Brújula



Figura C-1.: Elementos y conexión a SDR.

Practica: Realizar la practica con las siguientes actividades:

1. Conectar el sistema como se ilustra en la figura.
2. Obtener mediante algún *software* la ubicación en altura y azimut del Sol_☉.
3. Ubicar en altura al radiotelescopio. Tener en cuenta el Off-set de la antena.
4. Iniciar con la toma de datos en dB desde Azimut 0° con incrementos en azimut de 20° hasta completar 360°.

5. Registrar en un archivo y graficar la intensidad.
6. Tomar imágenes del *software* para cada azimut.

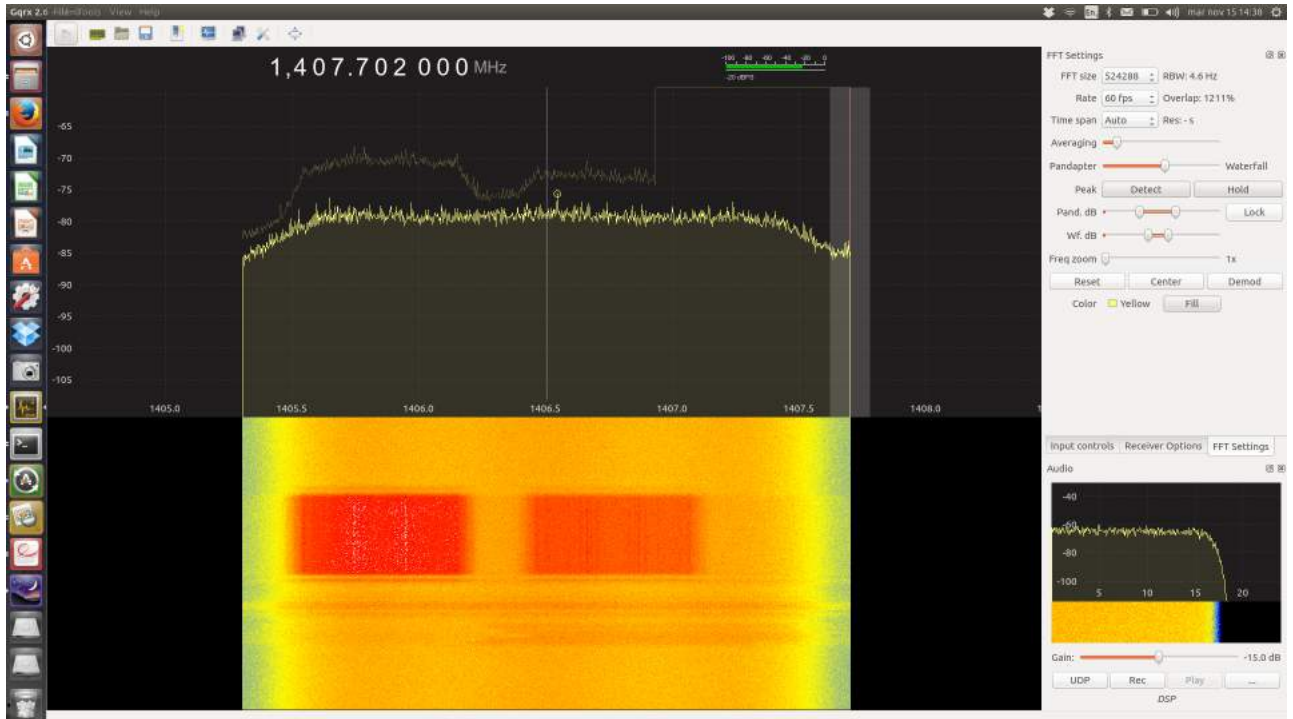


Figura C-2.: Recepción de señal o intensidad Solar.

En el vídeo [▶](#) (IMFR11GHz, Antena paraboloide hacia el Sol, 2018)¹ en el canal de YouTube del proyecto se puede observar el concepto anterior claramente

¹IMFR11GHz-AnexoC1-01-Rotacion antena paraboloide, youtube vídeo

C.2. Obtención del diámetro angular del Sol_☉ con el Radio Interferómetro IMFR11GHz

Objetivo: Es realizar las medidas suficientes a diferentes *Baseline* del Sol_☉, obtener patrones de interferencia y ajustar una función *Sinc* para obtener el diámetro del Sol_☉. Este laboratorio debe realizarse en grupos de 2 a 3 estudiantes. Los estudiantes notaran la diferencia en cuanto a la resolución entre una radiotelescopio sencillo y con la técnica de interferometría.

Equipo e instrumentos: Para desarrollar el laboratorio se utilizan los siguientes elementos:

1. Radio interferómetro IMRF11GHz.
2. Gabinete de Manejo de Señal.
3. Un PC portátil que tenga instalado Python Notebook.
4. Goniómetro
5. Brújula
6. Un par de llaves tipo alemana No. 14. Para variar la posición de los espejos.

Practica: Realizar la practica siguiendo las siguientes actividades:

1. Verificar el ángulo de inclinación del mástil del LBNF se encuentre entre 22-23°.
2. Verificar que los espejos laterales estén orientados a 45° respecto a la línea longitudinal de la guía *Baseline*.
3. Verificar que los espejos estén verticales respecto del plano de la guía *Baseline*.
4. Conectar el *joystick* según las marquillas de sus conectores rápidos.



Figura C-3.: Sesión típica para el Interferómetro IMFR11GHz.

5. Conectar eléctricamente a 110V AC el tablero de potencia.
6. Conectar eléctricamente a 110v AC el gabinete de manejo de señal.
7. Conectar el cable coaxial del LBNF a la entrada de señal del gabinete de manejo de señal.
8. Conectar el cable USB entre el computador portátil y el gabinete de manejo de señal (salida USB).
9. Iniciar el computador portátil.
10. Ubicar los espejos en el *Baseline* definido de muestreo.
11. Obtener la posición actual de la fuente extendida (Sol_☉) con un software (i.e., *Stellarium*) o tabla de posición en azimut y altura.
12. Retirar el freno de rotación en azimut.
13. Apuntar en Altura y en Azimut, con el *joystick*, verificando con el Buscador Solar que se esta apuntando al Sol_☉. Alejar en azimut unos 5° de la fuente extendida.

14. Iniciar la captura de datos con el *script* [Visualizacion.sh](#) y barrer el diámetro del sol en un lapso de tiempo corto (5 - 10 segundos), pasar en azimut unos 5° de la fuente extendida.
15. Finalizar la captura de datos y guardar el archivo generado *radiosun.log* con la nomenclatura apropiada para sus posterior análisis.
16. Repetir los pasos 10 al 15 con el nuevo *Baseline* de muestreo.
17. Procesar los datos de cada muestreo, es decir cada *Baseline* en *Python Notebook*, para obtener el máximo y mínimo de cada patrón de interferencia con la rutina [IMFR11GHz Plots fringes sesion.ipynb](#).
18. Calcular la visibilidad para cada muestreo con la rutina en *Python Notebook* [IMFR11GHz Sinc ajuste.ipynb](#).
19. Graficar la visibilidad en función de B_λ .
20. Ajustar la función *Sinc* a los datos.
21. Calcular el diámetro del Sol $_{\odot}$

C.3. Construcción de una imagen 2D de una fuente extendida.

Objetivo: Realizar una imagen de un sector del cielo, de tal forma que se pueda evidenciar estructuras o fuentes extendidas. Mediante el paneo o barrido del radio interferómetro en altura a diferentes posiciones de azimut los estudiantes podrán construir una imagen en radio a 11 GHz del cielo.

Equipo e instrumentos: Para desarrollar el laboratorio se utilizan los siguientes elementos:

1. Radio Interferómetro IMFR11GHz.
2. Gabinete de Manejo de Señal.
3. Un PC portátil que tenga instalado Python Notebook.
4. Goniómetro
5. Brújula
6. Un par de llaves tipo alemana No. 14. Para variar la posición de los espejos.



Práctica: Realizar la práctica con las siguientes actividades:

1. Conectar el LBNF del interferómetro al gabinete de manejo de señal, y la salida del gabinete al PC Portátil.
2. Obtener mediante algún *software* la ubicación en altura y azimut del Sol_☉.
3. Ubicar en altura y azimut al radio interferómetro alejado unos 30° en ambas coordenadas.
4. Iniciar con la toma de datos moviendo en altura el radio interferómetro hasta sobrepasar la posición del sol unos 30°.

5. Repetir la toma de datos acercando en azimut unos 5° hacia el Sol_\odot , y continuar repitiendo la toma de datos a intervalos de 5° hasta sobrepasar unos 30° en azimut la ubicación del Sol_\odot .
6. Mediante *Python notebook* reconstruir la imagen graficando los datos obtenidos en función del azimut y la altura,

D. Anexo: Manuales (videos) de operación y mantenimiento

En los siguientes vídeos que se pueden consultar en el canal de *youtube* del proyecto, se pueden observar las rutinas de operación y mantenimiento del radio interferómetro IMFR11GHz.

1. Vídeo  de Operación y Manejo del radiotelescopio interferómetro.¹
2. Vídeo  de Mantenimiento y ajuste del radiotelescopio interferómetro.²

¹IMFR11GHz-AnexoD-01-Manual de Operacion, youtube vídeo

²IMFR11GHz-AnexoD-02-Manual de Mantenimiento, youtube vídeo

E. Multimedia

En el site de Github del proyecto se pueden consultar los archivos multimedia del proyecto que son útiles para entender el funcionamiento del Interferómetro y la electrónica de manejo de señal. Estos archivos son *DataSheets* y Manuales de componentes.

1. Datasheet Actuador lineal 2527.pdf
2. Datasheet ADC ads1115.pdf
3. DataSheet antenas Broadcast tipicas 8681.pdf
4. Datasheet Amplificador ZX60-2534MA+.pdf
5. Datasheet Atenuador CATTEN-06R0.pdf
6. Datasheet Atenuador CATTEN-0100.pdf
7. Datasheet Cable Coaxial CNT-100 .pdf
8. DataSheet Detector Schottky Diode 1849.pdf
9. Datasheet Filtro pasabanda VBFZ-1400+.pdf
10. Datasheet LBNF Aspen 11.2 GHz.pdf
11. Datasheet microporcesador ESP32.pdf

12. Datasheet regulador de Voltaje bp5277.pdf
13. Datasheet union Impedancia PE7075.pdf
14. Datasheet Antenas RTP30v4.pdf
15. Perfilera estructural en acero.pdf

Bibliografía

- [1] G Pinzon, D Gonzalez, and A Ramirez. Análisis comparativo de seis lugares de interés para la ubicación de instrumentación astronómica en Colombia. *Ciencias Físicas*, pages 53–68, enero-marzo, 2016.
- [2] G Chaparro, O Ramirez, O Restrepo, and A Martinez. Low dimensional embedding of climate data for radio astronomical site testing in the Colombian Andes. page 29, Septiembre 15, 2017.
- [3] J Koda, J Barrett, T Hasekawa, G Shafto, J Slechta, and S Metchev. A Michelson-type radio interferometer for university education. page 9, January 14, 2016.
- [4] A Michelson and F Pease. Measurement of the diameter of Alpha Orionis with the interferometer. *Astrophysical Journal*, 53:249–259, 1921.
- [5] P. Hariharan. *Optical Interferometry*. Academic Press, Sydney, Australia, 1985.
- [6] J.M Polard. *Amateur Radio Astronomy*. Online, Louargat, Brittany France, 2016.
- [7] T.K Das, H Sarkar, and A Sen. The ratio of the radio and optical diameters of the sun at centimeter wavelengths. *Solar Physics*, 194:155–163, Septiembre 15, 2017.
- [8] F FALCINELLI. How to use ral10kit and ral10ap to build a microwave radio telescope. Technical report, RadioAstroLab s.r.l., January 22, 2017.

- [9] J Anguera and A Perez. Teoría de antenas. In *Guia de Estudio*, pages 1–335, 2008.
- [10] W.T Sullivan. Some highlights of interferometry in early radio astronomy. *ASP Conference Series, Department of astronomy FM-20*, 19:132–149, 1991.
- [11] S.J Gregg and K.S.W Sing. *Antenna Theory, Analysis and Design*. Jhon Wiley Sons, Hoboken, New Jersey, 2005.
- [12] A E Roy and D Clarke. *Astronomy, Principles and Practice*. IoP, USA, 2011.
- [13] D Fisher. *Basics of Radio Astronomy, for the Goldstone-Apple Valley Radio Telescope*. JPL, Jet Propulsion Laboratory, California, April 1998.
- [14] T.L Wilson, K. Rohls, and S Huttemeister. *Tools of radioastronomy*. Springer, Germany, 2009.
- [15] M.R. Kundu. *Solar radio astronomy*. Jhon Wiley Sons, New York, 1965.
- [16] J.C Guevara. *Design and development of a solar radio interferometer of two elements*. Tesis de maestria, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá Colombia, 2017.