



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA
OPCIÓN EN AUTOMATIZACIÓN

“SCI-HI: Integración de un interferómetro de dos antenas”

T E S I S

Presentada para obtener el título de:
Maestro en Ciencias de la Electrónica, Opción en Automatización

Presenta:

Lic. Luis Javier Ulloa Velazquez*

Directores:

Dra. Olga Guadalupe Félix Beltrán (FCE-BUAP)

Dr. Germán Ardul Muñoz Hernández (FCE-BUAP)

Dr. Omar López Cruz (INAOE)

Puebla, México

DICIEMBRE 2020

*Becario CONACYT.

Agradecimientos

Agradezco profundamente a toda mi familia por su apoyo, principalmente a mi esposa por la comprensión brindada y creer en mi, a mi hermana Reina y cuñado Jorge por los valores y hábitos inculcados, además de la motivación que toda la vida me han dado.

A los directores de tesis, Dra. Olga Félix por toda la atención y seguimiento brindado, al Dr. Germán Ardul por su apoyo y orientación, al Dr. Omar López por la disponibilidad y atención, a todos ellos por la confianza brindada, motivación, por compartirme su experiencia, gracias por los consejos académicos y personales.

Al Dr. Richard Torrealba por las asesorías, seguimiento y consejos que me ayudaron a sacar adelante este trabajo, por permitirme hacer uso de su laboratorio donde se realizaron las pruebas.

A los integrantes del jurado, por la retroalimentación y seguimiento a lo largo del proyecto.

A todos y cada uno de mis compañeros y profesores de la MCEA, por su amistad, conocimiento brindado, compañía y apoyo en todo momento.

A la Facultad de Ciencias de la Electrónica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, por permitirme formar parte del posgrado y hacer uso de todas sus instalaciones.

Al INAOE por permitir hacer uso de sus instalaciones y equipos de laboratorio.

Al CONACYT por su apoyo económico que fue de gran ayuda a lo largo de la maestría.

Dedicatoria

A mi amada esposa Adriana Ruiz,
mi pequeña hija Karlita y a la
memoria de mi madre.

Resumen

En este trabajo se realiza una revisión de los antecedentes históricos que llevan a la implementación de la técnica de interferencia en la radioastronomía, también el estudio necesario para la aplicación del análisis espectral de señales; se presentan las pruebas de integración de un radio-interferómetro de dos antenas para el experimento “Sonda Cosmológica de la Isla para la detección del Hidrógeno Neutro” (SCI-HI), con un ancho de banda de 40-120MHz, frecuencias correspondientes al desplazamiento hacia el rojo de las emisiones del HI dadas por la evolución temporal. El sistema propuesto está basado en la plataforma de la tarjeta ROACH2 con tecnología FPGA, aplicando ajustes programables al sistema para un correcto muestreo, dichas pruebas son realizadas a nivel laboratorio.

Se describe el esquema que representa la integración de la electrónica del interferómetro asociada a la etapa front-end, así como el diagrama que representa la programación y desarrollo del firmware en diagramas de bloques de simulink para la implementación en la tarjeta ROACH2. Se crea una interfaz mediante el lenguaje de programación Python para comunicación ROACH2-PC y visualización en tiempo real de las señales, esta tiene el propósito de cargar el archivo de programación a la ROACH2, ajustar las señales y crear archivos log para su posterior análisis, se presenta una segunda interfaz desarrollada encargada de tomar los archivos log y realizar un análisis estadístico de los espectros almacenados en un tiempo dado de muestreo.

Índice general

Agradecimientos	II
Resumen	IV
Introducción	VII
Objetivos	XIV
1. Antecedentes históricos	1
1.1. Radiotelescopios	1
1.2. Interferómetro de dos elementos	3
1.3. El proyecto M87 Event Horizon Telescope	9
1.4. Análisis espectral de señales	11
2. Hardware para la adquisición y procesamiento	21
2.1. Teoría de antenas	21
2.1.1. Antena receptora	28
2.2. Filtrado de señales	30
2.3. Amplificación de señales	34
2.4. Tarjeta ROACH2	36
2.5. Módulo ADC	38
3. Ambiente CASPER y diseño del interferómetro	41
3.1. Ambientación de Software	41
3.2. Flujo del modelado MATLAB-Simulink	44
3.3. Construcción de un interferómetro en Simulink con bloques CASPER	45
3.3.1. Retraso de la señal	45
3.4. Banco de filtros Polifásicos	49
3.5. Integración de la electrónica	53
3.6. Front-end y acondicionamiento eléctrico de equipos	53
4. Interfaz de visualización y de análisis fuera de línea	57
4.1. Estructura de las interfaces en Python	57

5. Pruebas del interferómetro de dos antenas	65
5.1. Ajustes del sistema	65
5.2. Pruebas y análisis de resultados	71
6. Conclusiones	77
Bibliografía	79
A. Constancias de congreso	82
B. Artículos	86

Introducción

El proyecto denominado Sonda Cosmológica de la Isla Guadalupe para la detección de Hidrógeno Neutro a alto corrimiento al rojo $14.8 < z < 22.7$, conocido como SCI-HI, es encargado de la búsqueda de señales de hidrógeno neutro, que caracterizarían la formación de las primeras galaxias, que los científicos calculan que se originaron 200 millones de años después del Big Bang, una etapa muy temprana del Universo, tanto que se estima que representa aproximadamente 1% de su edad, que en la actualidad se cree en alrededor de 14 mil millones de años. Un objetivo principal del proyecto es cronometrar la formación de las primeras estrellas y galaxias, y el fin de la época oscura del universo. La principal ventaja de SCI-HI respecto a los radio telescopios más grandes del mundo, es que se encuentra en una de las mejores zonas radio silentes de nuestro planeta, la Reserva de la Biosfera Isla Guadalupe a unos 260 km de la península de Baja California, el instrumento constaba de una antena de banda ancha (Hibiscus) [1], la implementación del experimento se muestra en la Figura 1.

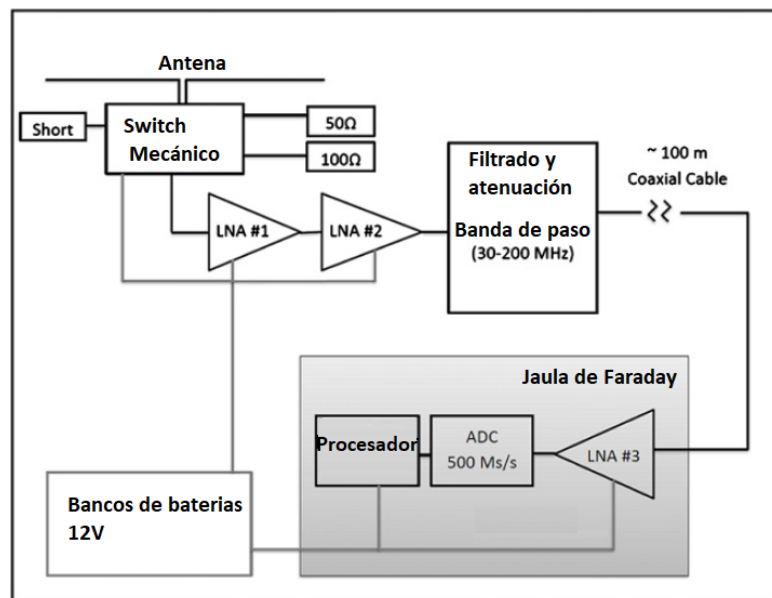


Figura 1: Implementación del sistema de adquisición y procesamiento de datos SCI-HI [1].

los experimentos con los que hace frente SCI-HI incluyen PAPER (Precision Array for Probing the Epoch of Reionization), instrumento basado en un interferómetro de 64 antenas para mapear las emisiones de 21 cm de hidrógeno neutro a corrimientos al rojo $z = 7 - 12$, la implementación del correlador está basado en hardware CASPER [2], MWA (MURCHISON WIDEFIELD ARRAY) que trabaja a un ancho de banda de 80-300MHz, un precursor del arreglo SKA (Squared Kilometer Array) [3].

Las señales que llegan hasta las antenas de los radiotelescopios son presentadas como voltajes inducidos, son generadas mediante procesos naturales y en forma de ruido aleatorio gaussiano, por lo que la tensión en función del tiempo en los terminales de una antena receptora está descrita como una serie de impulsos muy cortos aleatorios, que se combinan como forma de onda con una distribución de amplitud gaussiana, la potencia recibida (P_A) y entregada por la antena a una carga combinada en un ancho de banda Δv , de una fuente polarizada aleatoriamente de densidad de flujo S , que supone que es pequeña en comparación con el ancho de haz, está dada por [4]:

$$P_A = \frac{1}{2}SA\Delta v, \quad (1)$$

donde S es la intensidad I_ν integrada sobre el ángulo sólido de la fuente, A es el área de recolección de una antena reflectora, el factor $\frac{1}{2}$ toma en cuenta el hecho de que la antena responde sólo a la mitad de la potencia de la onda polarizada aleatoriamente, es conveniente expresar la potencia de ruido aleatorio P en términos de una temperatura efectiva T , donde T es el factor de transmisión [4]:

$$P = kT\Delta v, \quad (2)$$

donde k es la constante de Boltzman.

La mayor parte de la potencia se encuentra en forma de radiación continua, por lo que su espectro de potencia es una variación gradual con la frecuencia, en la figura 2 se observa el espectro de ocho tipos de fuentes cósmicas continuas, cada fuente de radiación mostrada en la figura corresponde a¹:

Cassiopeia A, es el espectro del remanente de una supernova.

Cygnus A, hace referencia a una radio galaxia.

3C48, pertenece a un cuasar.

M82, pertenece a una galaxia estelar.

TW Hydrae, corresponde a un disco protoplanetario.

NGC7207, corresponde a una nebulosa planetaria.

MWC349A, hace referencia al viento estelar ionizado.

En el capítulo 1 se describe la densidad de flujo y sus unidades, por ahora solo se ilustra la respuesta de espectros.

¹Para propósitos prácticos, están definidos los bordes de la porción de radio del espectro electromagnético que se establecerán por los límites impuestos por la reflexión de la ionosfera a bajas frecuencias (10MHz) y a la absorción atmosférica a altas frecuencias (1000 GHz), algunos datos fueron tomados de la base de datos extragaláctica NASA/IPAC(2013) [4].

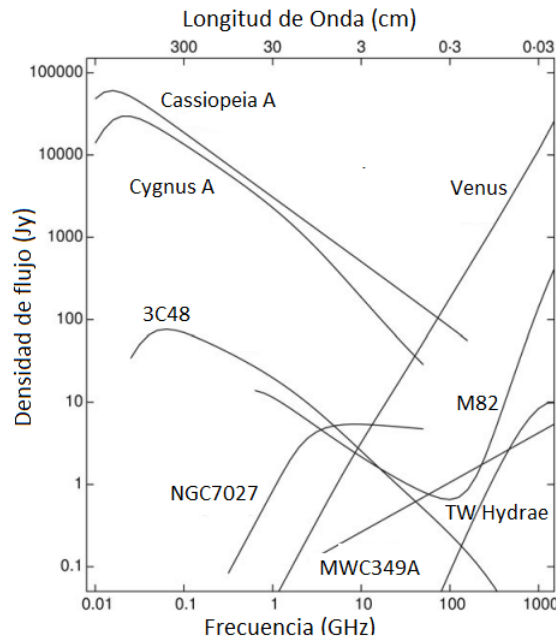


Figura 2: Ejemplo de ocho tipos diferentes de fuente continua [4].

Hidrógeno interestelar

La Vía Láctea, es una galaxia espiral, con un bulbo central de estrellas y alrededor del disco tiene sus brazos espirales, gas, polvo y estrellas. Tiene un halo donde se ubican los cúmulos globulares y unas nubes de hidrógeno neutro de muy alta velocidad, también contiene gas tenue, ionizado (aquel cuyos átomos han perdido o ganado electrones debido a cargas eléctricas) de alta temperatura llamado gas coronal. Los componentes más importantes en el medio interestelar son: gas (compuesto por H 60 % y 30 % He por masa); polvo, que van desde moléculas hasta rocas, polvo que se encuentra mezclado con el gas interestelar; rayos cósmicos, partículas cargadas de alta energía, como pueden ser protones, núcleos atómicos, antiprotones, electrones, etcétera [6].

El hidrógeno, el gas más ligero y abundante en el Universo, alrededor de tres cuartas partes del universo es hidrógeno, su átomo consiste de un protón con un electrón girando a su alrededor. El hidrógeno interestelar (hidrógeno que se encuentra en el espacio que hay entre las estrellas) es detectable cuando se encuentra cerca de alguna estrella caliente, una parte de la energía que irradia la absorbe el hidrógeno, el cual brilla con una luz característica azul-roja. Hendrik van den Hulst (1944) estudió el comportamiento del hidrógeno frío (gas que se encuentra demasiado alejado de las estrellas brillantes por lo que es muy frío e incapaz de brillar) mostrando que dichos átomos del gas deberían emitir ondas de radio a una frecuencia bien definida de 1420.405751769 MHz, equivalente a una longitud de onda de 21 cm, obtenidas mediante procesos atómicos y moleculares, que resulta de la transición entre dos niveles de energía del

átomo. Sobre las distancias del orden de 1kpc (pc corresponde a la abreviación de parsec ²) ocurren suficientes transiciones como para ser detectable con radio antenas. La emisión de 21 cm con desplazamiento al rojo debe mostrar la estructura angular y la estructura de frecuencias debido a las inhomogeneidades en la densidad del gas, un mapa completo de la distribución de hidrógeno atómico en función del desplazamiento al rojo proporcionaría una imagen tridimensional, con estructura similar al de un queso suizo del medio intergaláctico durante la reionización, como muestra la figura 3, donde las cavidades en la distribución de hidrógeno son las burbujas ionizadas alrededor de grupos de galaxias tempranas [7].

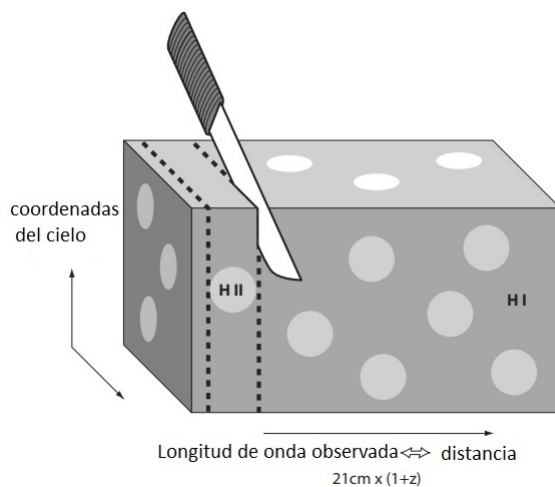


Figura 3: Imágenes de 21 cm, burbujas ionizadas durante la época de la reionización [7].

En la figura 4 se resumen las características clave de la señal de 21 cm, con escalas relevantes de tiempo cósmico, frecuencia y desplazamiento al rojo. El primer periodo de la señal surge posterior al desacoplamiento térmico de la materia ordinaria (bariones³) del fondo del medio interestelar, de modo que el gas puede enfriarse adiabáticamente con la expansión del Universo. En estas edades oscuras cósmicas, antes de formarse las primeras estrellas, las primeras estructuras comienzan a crecer a partir de fluctuaciones cuánticas durante la inflación. El gas frío se puede ver en una señal de absorción de 21 cm, que presenta un valor medio (presentado en la parte inferior) y las fluctuaciones que surgen de la variación en la densidad (mostradas en el panel superior). Una vez que se formaron las primeras estrellas y galaxias, su luz altera drásticamente las propiedades del gas. Inicialmente, esto conduce a una fuerte señal de absorción que varía, especialmente debido al fuerte agrupamiento de la primera generación de galaxias, la emisión de rayos X de estas galaxias calientan el gas que conduce a una señal de emisión de 21 cm, finalmente, los fotones UV ionizan el gas produciendo agujeros oscuros en la señal de 21 cm dentro de las regiones de burbujas ionizadas que rodean grupos de galaxias

²pc es una unidad de distancia, donde $1\text{pc}=3.1 \times 10^{16}\text{m}$ [7].

³Barión: una partícula que contiene tres quarks, especialmente un neutrón o protón [5].

[8]. En la figura 4 se puede observar la evolución temporal de las fluctuaciones en el brillo de 21 cm, desde justo antes de que se formaran las primeras estrellas hasta el final de la época de la reionización. Dicha evolución se ensambla a partir de cortes de desplazamiento al rojo a través de un volumen cósmico simulado. La coloración indica la intensidad del brillo de 21 cm a medida que evoluciona a través de dos fases de absorción (púrpura y azul), separadas por un periodo (negro) donde la temperatura de excitación de la transición de hidrógeno de 21 cm se desacopla de la temperatura del gas de hidrógeno, antes de las transiciones a emisión (rojo) y finalmente desaparecen (negro) debido a la ionización del gas de hidrógeno. Se observa también la evolución esperada del brillo promedio en el cielo de 21 cm desde la edad oscura en el desplazamiento al rojo 20 hasta el final de la reionización, en algún momento antes del desplazamiento al rojo 6 (la curva continua indica la señal, línea discontinua indica $T_b=0$), la estructura de frecuencias de este intervalo de desplazamiento al rojo es impulsada por varios procesos físicos, que incluye la formación de las primeras galaxias y el calentamiento e ionización del gas de hidrógeno [8].

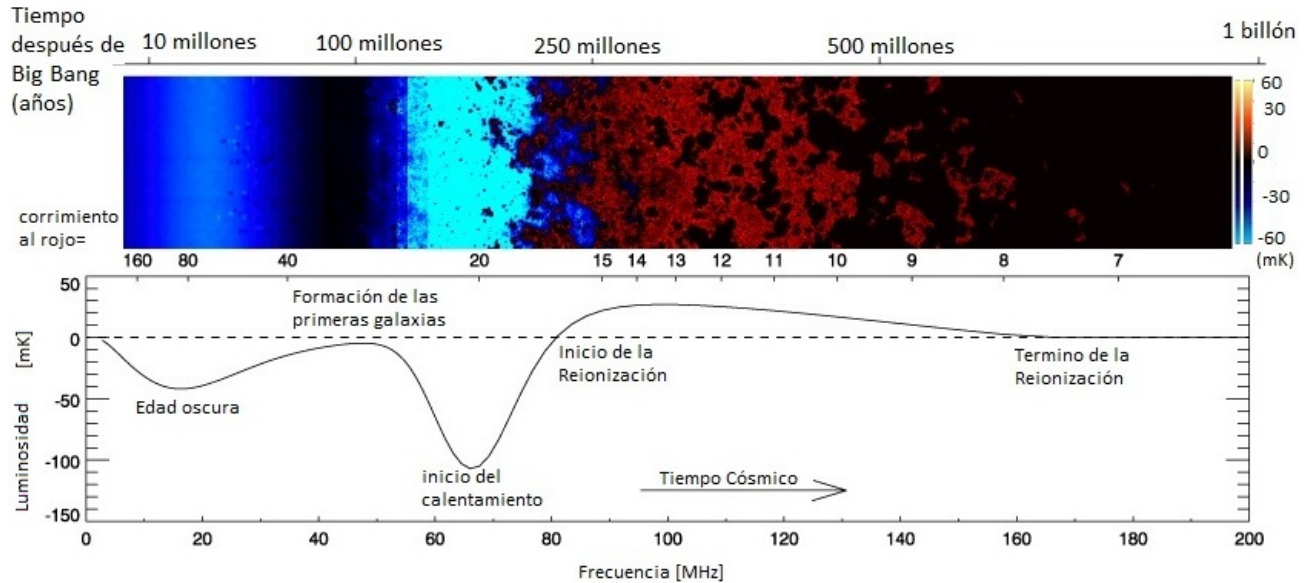


Figura 4: Características relevantes del tiempo cósmico, frecuencia y desplazamiento al rojo [8].

Desplazamiento z al rojo

El desplazamiento al rojo z de un objeto es el desplazamiento Doppler fraccional de su luz emitida como resultado del movimiento radial, que está dada como [9]:

$$z \equiv \frac{v_e}{v_0} - 1 = \frac{\lambda_o}{\lambda_e} - 1, \quad (3)$$

donde v_o y λ_o son la frecuencia observada y la longitud de onda recibida, v_e y λ_e son las emitidas, respectivamente. En la relatividad, el desplazamiento al rojo está relacionado con la velocidad radial v por [9]:

$$1 + z = \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}}, \quad (4)$$

con c como la velocidad de la luz. El desplazamiento al rojo es directamente observable y la velocidad radial no lo es, en otras palabras podemos definir el desplazamiento al rojo cosmológico como la parte del desplazamiento al rojo debido únicamente a la expansión del Universo, o flujo de Hubble. En términos de la Cosmología, el corrimiento al rojo cosmológico está directamente relacionado con el factor de escala $a(t)$ o el “tamaño” del Universo. Para un objeto en desplazamiento al rojo z :

$$1 + z = \frac{a(t_o)}{a(t_e)}, \quad (5)$$

donde $a(t_o)$ es el tamaño del Universo en el momento en que se observa la luz del objeto y $a(t_e)$ es el tamaño en el momento en que se emitió [9].

Estructura del documento

A continuación se describe los contenidos de los capítulos y apéndices:

- Capítulo 1, antecedentes históricos: Se dan a conocer algunos antecedentes teóricos e históricos para tener noción sobre los orígenes y las bases de la interferometría y el análisis detrás de ello.
- Capítulo 2, hardware para la adquisición y procesamiento: Se presentan los dispositivos para la implementación de la etapa del front-end y la revisión de las características que la tarjeta ROACH2 tiene.
- Capítulo 3, ambiente CASPER y diseño del interferómetro: presentan las características de ambientación de una PC para la programación de la ROACH2, se desarrolla el diseño del interferómetro en Simulink y se explica las etapas que lo conforman.
- Capítulo 4, integración de la electrónica: Es presentado el esquema de la integración de la electrónica para la operación del interferómetro y monitoreo de variables de temperatura y voltaje.
- Capítulo 5, interfaz de visualización y de análisis fuera de línea: Se describe la interfaz realizada en Python para poder programar y operar la tarjeta ROACH2, posteriormente se describe la interfaz que sirve para procesar los archivos generados en un tiempo de muestreo.
- Capítulo 6, pruebas del interferómetro de dos antenas: Se realizan los ajustes al sistema y se prueba la integración de una antena mango peel para la recopilación de información de los espectros que contiene el ambiente en la zona de pruebas.

- Conclusiones: Se abarcan los objetivos alcanzados, área de aprendizaje y mejoras que se podrían realizar en futuros trabajos.
- Apéndice A, Constancias de congreso: Se agregan las constancias de los congresos aceptados.
- Apéndice B, Artículos: Se presentan los artículos aceptados.

Objetivos

Objetivo general

- Integrar un Interferómetro para dos antenas basado en la tecnología FPGA para el experimento Sonda Cosmológico de la Isla Guadalupe para la Detección de Hidrógeno neutro (SCI-HI), con redundancia en las calibraciones.

Objetivos específicos

- Revisar la bibliografía del estado del arte de los tópicos principales del tema de tesis.
- Estudiar los conceptos básicos del marco cosmológico.
- Estudiar y comprender el mecanismo de radiación electromagnética y su física, esto para comprender las bases de radio interferometría.
- Estudiar y comprender la programación de las tarjetas FPGA's y el ambiente CASPER.
- Construir y programar un interferómetro de dos antenas para trabajar en el intervalo de 40-120 MHz.
- Integrar la electrónica y aplicar las técnicas básicas de medición.
- Realizar pruebas experimentales.
- Publicar los resultados.
- Escribir el documento de tesis.

El diagrama general que se implementa está descrito en la figura 5, la recepción consta únicamente de las antenas, el acondicionamiento incluye el filtrado y amplificación analógica, la conversión que es la etapa de pasar de señal analógica a una digital, el procesamiento en la tarjeta incluye los ajustes necesarios a la señal e interferirlas junto con obtener el espectro de interés, por último mediante una Raspberry se realiza la conmutación entre la señal de las antenas y una carga conocida para contemplar las variaciones que pueda producir el sistema

de recepción, también realiza la interfaz y comunicación a través de programación en Python.

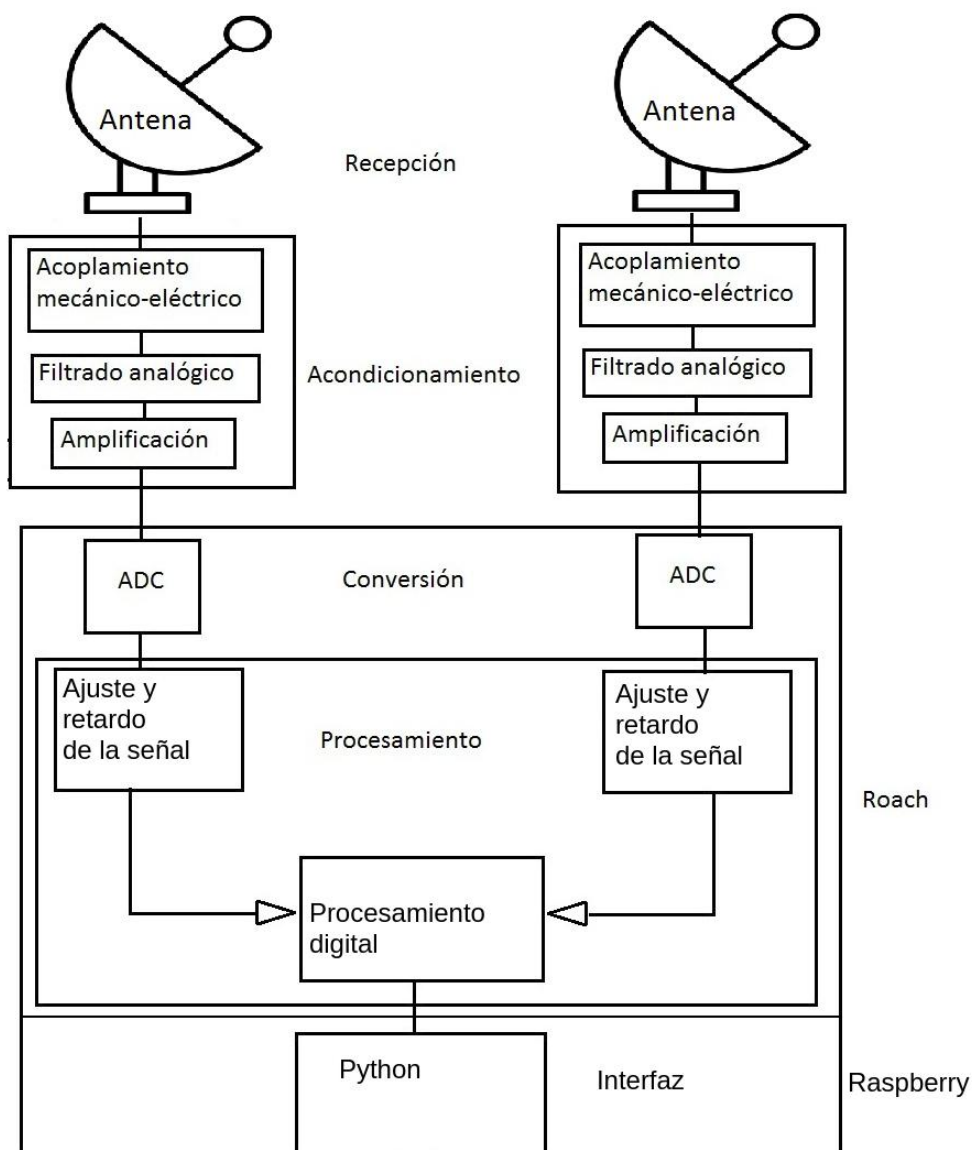


Figura 5: Esquema general del interferómetro a implementar.

Capítulo 1

Antecedentes históricos

En este capítulo se presenta un breve resumen de los antecedentes históricos de los interferómetros en la astronomía, así como una descripción de los elementos básicos para la construcción de un interferómetro de dos antenas, dicho instrumento combina luz de dos o más telescopios de la cual permite escoger los detalles de un objeto que está siendo observado, la distancia entre 2 antenas también conocida como separación forma una línea de base que representa el diámetro de un telescopio virtual creado por la interferometría, cuando más líneas de base se utilicen más información obtendremos sobre un objeto, pues cada línea de base revela una pieza diferente de la información que componen una imagen. Cada telescopio en interferometría observa el mismo objeto astronómico, y cada uno recoge parte de la luz que emite, esto sólo funciona si la luz recibida por cada telescopio es combinada de manera exitosa [10].

1.1. Radiotelescopios

La astronomía se cuestiona sobre la formación, evolución, dinámica y demás características de los objetos más allá de la atmósfera terrestre, los astrónomos realizan observaciones en todo el espectro electromagnético accesible, que extiende mucho más allá del espectro visible, en particular, cada gama de frecuencias contiene su propia información por lo que suelen exigir su propia variedad de detectores y telescopios, 13 MHz a 2 000 GHz es la gama de frecuencias en que la atmósfera es admisiblemente transparente, por lo que es en ese intervalo en el que se realizan los estudios [4].

La radio astronomía realiza el estudio del cielo en longitudes de onda de radio, radioastronomía incluye rayos X, IR y UV, el campo de la radioastronomía se inició en 1923, en los laboratorios Bell con Karl Jansky, al tratar de reducir el ruido en los receptores de radio, encontró que su antena recibía radiación de fuera de la atmósfera terrestre, notando que dicha radiación aparecía al mismo tiempo sideral, en diferentes días, por lo que su fuente debería estar muy lejana del sistema solar. A raíz de su descubrimiento, la unidad de densidad de flujo espectral

en radioastronomía lleva su nombre, donde [11]:

$$1 \text{ Jansky} = 10^{-25} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}. \quad (1.1)$$

A diferencia de los telescopios ópticos, que las imágenes dependen de las condiciones atmosféricas, los radiotelescopios nos pueden ayudar a observar imágenes que no pueden ser captadas por nuestros ojos e inclusive con cielo nublado, por estar en un intervalo de frecuencia fuera del visible o por estar demasiado lejano, debido a que los radiotelescopios trabajan a mayor longitud de onda, para obtener un nivel mayor de resolución deben tener una mayor área colectora [12].

La radioastronomía tiene la capacidad para detectar emisiones de astros a gran distancia, lo que revela aspectos del universo que no son posibles observar en otras longitudes de onda. Gracias a la radioastronomía se han estudiado las grandes cantidades de gas que se encuentran agrupadas en el espacio que existe entre las estrellas, mismo gas que se hace visible cuando la temperatura en el centro es suficientemente alta y se hacen visibles [13].

En la imagen de la figura 1.1 se puede apreciar a la izquierda una imagen séptica de la nebulosa de Orión obtenida con el Telescopio Espacial Hubble HTS de NASA/ESA, a la derecha una radioimagen de la emisión de la molécula de monóxido de carbono (CO) obtenida por el radiotelescopio de IRAM en pico de Veleta de 30 m, que se encuentra en la Sierra Nevada, en longitudes de onda de radio de la nebulosa de Orión, donde se destacan las estrellas más jóvenes que se encuentran dentro de la zona con mayor emisión denotadas de color rojo [13].

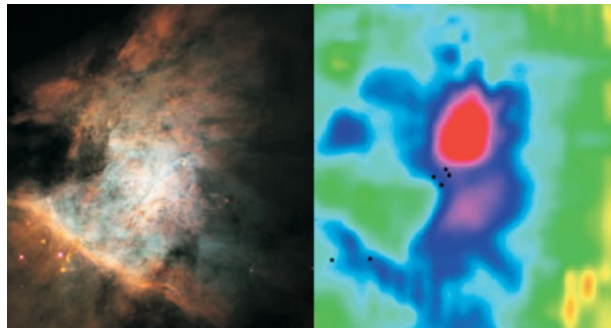


Figura 1.1: Comparación entre una imagen obtenida por el telescopio Hubble a la izquierda y una radioimagen obtenida por el radiotelescopio IRAM-IGN a la derecha [13].

1.2. Interferómetro de dos elementos

La técnica de Interferometría fue introducida por Michelson (1890-1920) y Michelson Pease (1921) quienes obtuvieron una resolución angular suficientemente fina para medir los diámetros de algunas de las estrellas más cercanas y grandes [4].

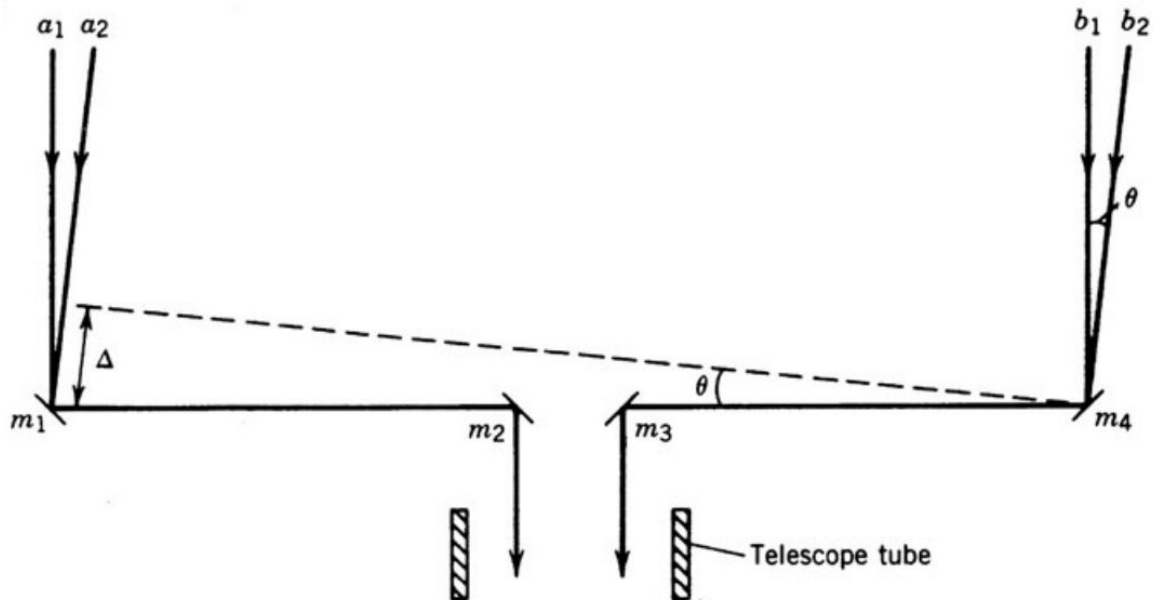


Figura 1.2: Arreglo del interferómetro estelar de Michelson-Pease [4].

En la figura 1.2 los rayos entrantes son guiados hacia la apertura del telescopio por los espejos m_1 a m_4 , donde el par externo define las dos aberturas del Interferómetro, los rayos a_1 y b_1 atraviesan caminos iguales al ocular en que se forma la imagen, sin embargo, los rayos a_2 y b_2 , que se aproximan al ángulo θ del eje instrumental trazan caminos diferentes en una distancia Δ .

Para atacar el problema de una resolución menor de los radiotelescopios en comparación a los telescopios ópticos, los radioastrónomos implementaron una técnica llamada interferometría, puesto que teóricamente se sabe que mientras mayor es la dimensión del telescopio mejor será la resolución de la imagen obtenida [12]. Cuando se tienen dos o más ondas que inciden en un mismo punto que provienen de diferente fuente e incluso desde la misma fuente pero por diferentes rutas pueden interferir. La interferencia en su mayoría de las veces, ocurre cuando las ondas que inciden son de la misma fuente, pero la ruta que siguen hasta el detector son diferentes, el patrón de interferencia se produce como resultado de la superposición de dichas ondas, por lo que se puede decir que la interferencia se utiliza para describir el caso donde las diferentes rutas están separadas [14]. Su funcionamiento retorna una señal que puede verse amplificada o cancelada dependiendo de las ondas que interfieren.

En la figura 1.3 se representa en color rojo una señal captada por una antena, y las demás

corresponden a otros casos de adquisición de una antena diferente, se observa que la misma señal es captada con desfases relativos, donde el caso *a*) corresponde a un desfase 0 por lo que el resultado de dicha suma resulta como una amplificación de la misma señal, para los demás casos y a medida que el desfase aumenta, la señal que resulta del proceso de interferirlas se va disminuyendo en amplitud, hasta llegar a tener un valor igual a cero para un desfase de $\lambda/2$, el fundamento de los grandes interferómetros se basa en el análisis del interferómetro de dos antenas, de ahí la mayoría de las matrices de síntesis son esencialmente un conjunto de interferómetros de dos elementos.

Se considera un interferómetro elemental como el mostrado en la figura 1.4, donde las antenas están separadas por una línea de base b , H_1 y H_2 representan la cadena de receptores integrados a su electrónica, τ_g el retardo de tiempo geométrico y τ_i el retardo del tiempo instrumental compensatorio, tomando en cuenta que los receptores están acondicionados para proporcionar cualquier amplificación, filtrado y de ser necesario conversión de frecuencias requeridas. El campo eléctrico incidente $E(I, m)$ de una fuente puntual distante induce un voltaje en la salida de las terminales de la antena, luego de que la señal pasa por los respectivos receptores y antes de pasar por el correlador las señales son denotadas como $v_{c1}(t)$ y $v_{c2}(t)$, al grupo de circuitos que se encargan de multiplicar y promediar dichas señales se denomina correlador [15].

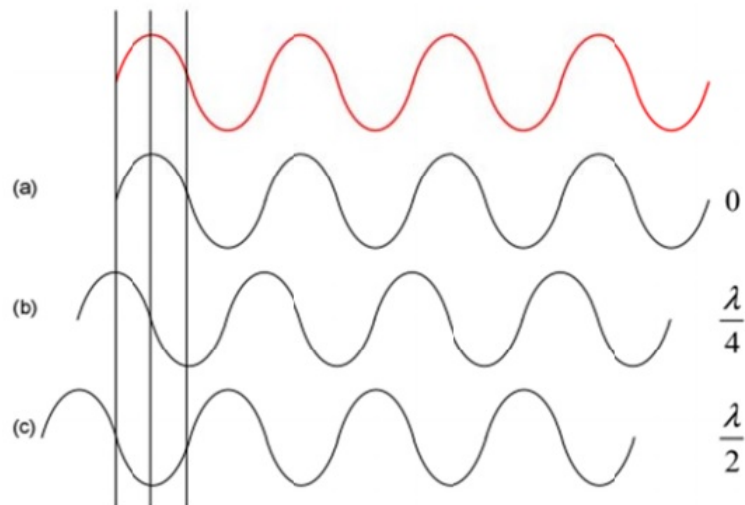


Figura 1.3: Visualización de distorsión y cancelación en el proceso de Interferometría: a) en fase respecto a la primera, b) en cuadratura, c) fuera de fase [16].

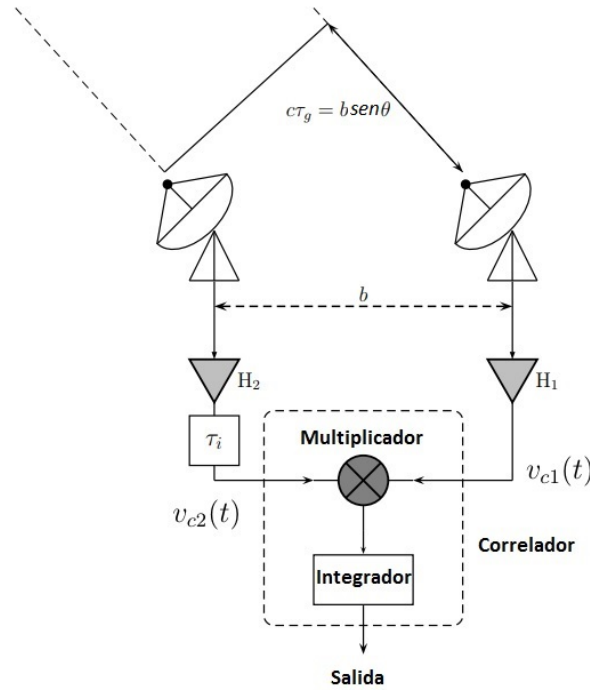


Figura 1.4: Esquema simplificado de un interferómetro de dos elementos [15].

La salida del correlador puede ser la correlación cruzada de los voltajes $v_{c1}(t)$ y $v_{c2}(t)$ como [15]:

$$r(\tau_g) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T v_{c1}(t) v_{c2}^*(t - \tau_g) dt, \quad (1.2)$$

con periodo de muestreo T , donde t representa el tiempo y τ_g el retardo en el tiempo de la señal, dentro del esquema simple del interferómetro de dos antenas es muy importante el ángulo horario θ definido por la normal a la superficie y el frente de onda incidente en las antenas.

Basado en la figura 1.5, se considera que la tensión de la señal recibida en la antena derecha está representada por $V \text{seno}(2\pi\nu_0 t)$, mientras que para la antena de la izquierda se considera que la tensión contiene un retardo de tiempo $\tau = (D/c) \text{coseno}(\theta)$, donde D es la distancia entre antenas, c la velocidad de la luz, y θ es la posición angular de la fuente, entonces, la señal recibida en la antena izquierda es $V \text{seno}(2\pi\nu_0(t - \tau))$, el detector del receptor genera una respuesta proporcional a [4]:

$$(V \text{seno}(2\pi\nu_0 t) + V \text{seno}(2\pi\nu_0(t - \tau)))^2, \quad (1.3)$$

la salida del detector contiene un filtro pasa bajas que elimina cualquier frecuencia superior a unos pocos Hz, por lo que al expandir la ecuación 1.3 se puede ignorar el término del armónico de $2\pi\nu_0 t$, entonces la salida del detector en términos de la potencia P_0 generada por cualquiera

de las antenas es [4]:

$$P = P_0[1 + \text{coseno}(2\pi\nu_0\tau)]. \quad (1.4)$$

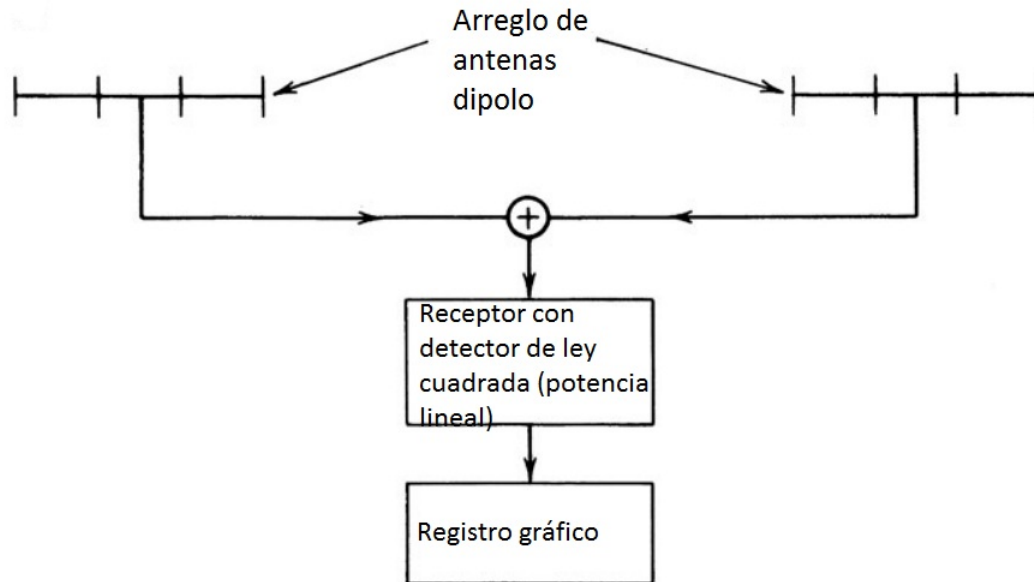


Figura 1.5: Interferómetro simple de 2 elementos con detector de ley cuadrada [4].

Los interferómetros de radio, básicamente son un conjunto de interferómetros de dos elementos, los cuales son utilizados para realizar mediciones de las emisiones de radio del cielo, donde son muy importante los parámetros como la intensidad, polarización y el espectro de frecuencias, la interferometría radioeléctrica permite realizar tales estudios. La resolución angular en el dominio de radio del espectro electromagnético, resulta en parte de la facilidad con que las señales de radiofrecuencia (RF) pueden procesarse electrónicamente con alta precisión [4].

Suponemos que se observa un objeto con dos antenas que forman un interferómetro básico, y dicho objeto presenta un ángulo ϕ de observación medido desde el cenit, mismo escenario que se observa en la figura 1.6, se puede conocer el patrón de radiación del interferómetro que está dado en función del ángulo horario es:

$$P(\phi) = e^{-\left(\frac{\phi\pi R}{\lambda}\right)^2} \text{coseno} \left(\frac{\pi b}{\lambda} \text{seno}(\phi) \right)^2, \quad (1.5)$$

donde R representa el radio de las antenas, λ es la longitud de onda a observar y b la separación de las antenas.

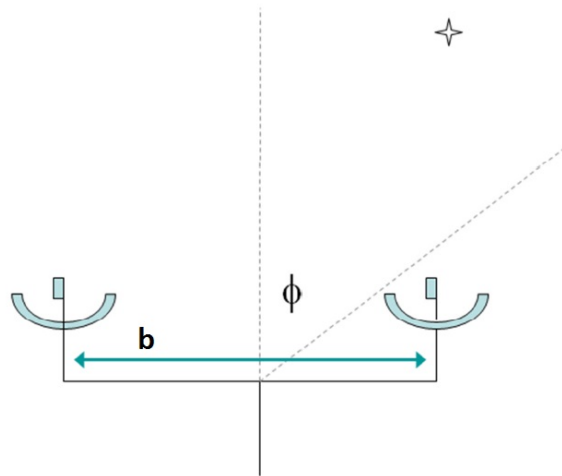


Figura 1.6: Esquema de un interferómetro de dos antenas y el ángulo ϕ entre el cenit y el objeto observado [17].

Se puede observar rápidamente que cuando la distancia que se crea entre las antenas es 0, es decir, la observación es directa con una sola antena, se tiene que la potencia es:

$$P_1(\phi) = e^{-\left(\frac{\phi\pi R}{\lambda}\right)^2}, \quad (1.6)$$

otro aspecto a tomar en cuenta es que normalmente la fuente está muy lejana a los receptores, por lo que los rayos que emite la fuente llegan en forma paralela entre sí a las antenas que se encuentran cerca y con un ángulo $\phi = 0$ como se ilustra en la figura 1.7.

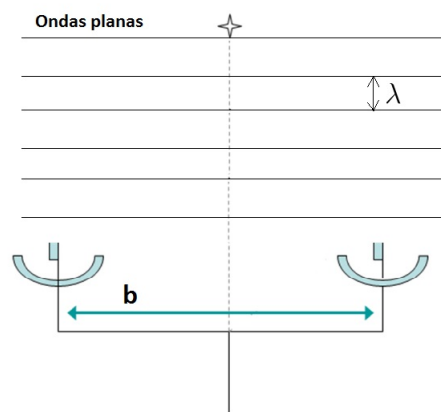


Figura 1.7: Esquema de un interferómetro de dos antenas y su ángulo de observación $\phi = 0$.

Para el caso en el que $\phi \neq 0$ como el que se presenta en la figura 1.8, se dice entonces que la fuente no está perpendicular a la superficie de la antena, por lo que la información que llega a una antena llegará con un desfase temporal a la otra antena.

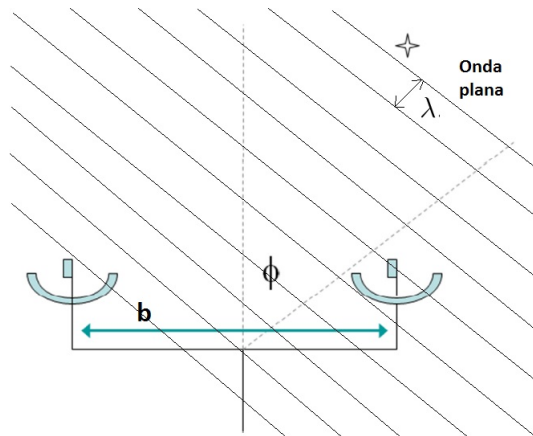


Figura 1.8: Esquema de un interferómetro de dos antenas y su ángulo de observación $\phi \neq 0$.

Como se mostró en la figura 1.4, se puede observar un retardador τ_i que está directamente relacionado con el retardo del tiempo geométrico, tal que al momento de correlacionar las dos señales, ambas contengan la misma información del frente de onda observadas. En radiointerferometría, ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) lidera su propia revolución; con una posibilidad de combinar hasta 66 antenas con 1225 líneas de base y distancia máxima entre las antenas de 16 km, dicha distribución se observa en la figura 1.9, las ondas que recibe son combinadas electrónicamente dentro de la poderosa computadora llamada correlador que se observa en la figura 1.10.



Figura 1.9: Distribución de antenas del proyecto alma [10].



Figura 1.10: Correlador ALMA [10].

1.3. El proyecto M87 Event Horizon Telescope

El Event Horizon Telescope (EHT) es una matriz de interferómetros de línea de base muy larga que observa en longitudes de onda de 1.3 mm, mide las componentes de Fourier de la distribución de brillo de la radiación del cielo, ello permite la reconstrucción de imágenes a escala de eventos del horizonte de un agujero negro súper masivo¹, la fuente de radio brillante que se extiende a 16.8 Mpc, donde la observación que se hace es la sombra del agujero negro. La matriz tiene una resolución angular nominal de $\frac{\lambda}{L}$ donde λ representa la longitud de onda a observar y L es la longitud de línea de base máxima proyectada entre los telescopios en la matriz, por lo que VLBI² crea un telescopio virtual que abarca casi todo el diámetro de la Tierra, los telescopios ampliamente separados muestran y registran de manera coherente el campo de radiación de la fuente, se crea una sincronía mediante GPS que logra una alineación temporal de estas mediciones en decenas de nanosegundos, durante las observaciones en condiciones atmosféricas aceptables, el tiempo de integración fue típicamente de 10 segundos, para después de la recopilación de datos se realice la correlación cruzada en una ubicación central alineando las mediciones en tiempo, la figura 1.11 muestra la distribución de los arreglos y antenas que conforman el EHT.

¹Los agujeros negros son una predicción fundamental de la teoría de la relatividad general, una particularidad que define a los agujeros negros es su horizonte de eventos, un límite causal unidireccional en el espacio-tiempo de la cual ni siquiera la luz puede escapar, con una masa exageradamente grande de mucho más de millones de miles de millones de masas solares [19].

²VLBI por las siglas en inglés: Very Long Baseline Interferometry [19].

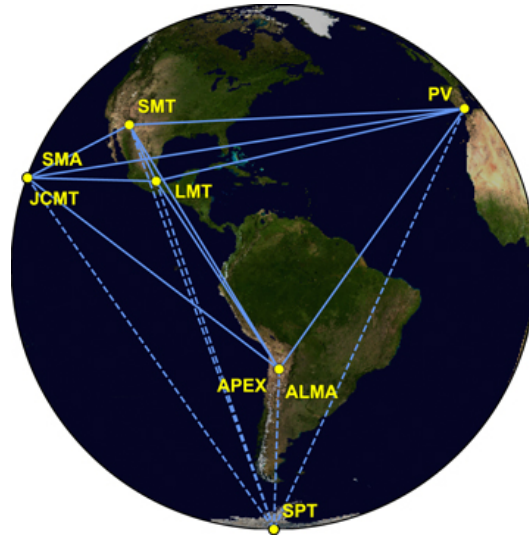


Figura 1.11: Localización geográfica y líneas de conexión entre los arreglos para realizar la Interferometría del EHT [18].

Los que conforman el arreglo son, en Chile ALMA: Atacama Large Millimeter/submillimeter Array, en Chile APEX: Atacama Pathfinder Experiment telescope, en México LMT: Large Millimeter Telescope Alfonso Serrano, en España PV: IRAM 30 m telescope on Pico Veleta, en Arizona SMT: Submillimeter Telescope Observatory in Arizona, en Hawai JCMT: the James Clerk Maxwell Telescope, en Hawai SMA: Submillimeter Array y en el Polo Sur SPT: South Pole Telescope.

Se realizaron observaciones del M87 el 5, 6, 10 y 11 de abril del 2017 con el EHT, obteniendo los resultados de la figura 1.12, las condiciones climáticas fueron de buenas a excelentes, las observaciones se programaron como una serie de exploraciones de 3 a 7 minutos de duración, en cada estación se observaban dos bandas de frecuencia anchas de 2GHz centradas en 227.1 y 229.1 GHz, las cuales se convirtieron a banda base utilizando técnicas estándares heterodinas, posteriormente se digitalizaron y registraron a una velocidad total de 32 Gbps. La correlación de datos fue realizada en el observatorio de Radioastronomía Max-Planck del MIT, las correlaciones fueron alineadas mediante una referencia de tiempo utilizando la geometría de la tierra y un modelo de reloj. Las calibraciones se realizaron haciendo un ajuste de franjas para identificar potencia de la señal correlacionada mientras se calibraban en fase los datos para ajustar la fase por demora residual, efectos atmosféricos y mala orientación o enfoque, siendo ALMA la estación de referencia por su alta sensibilidad al tener un gran arreglo interferométrico.

Para la creación de imágenes que presentan, fue a través de una selección de muestras específicas y en base a los resultados son comparables únicamente con las simulaciones, se realizaron múltiples algoritmos que replican las imágenes de acuerdo a los datos recolectados, siendo 3 los algoritmos que se utilizaron para generar las imágenes, y donde para una imagen final por muestra, se promediaron las imágenes [18, 19, 20, 21, 22, 23].

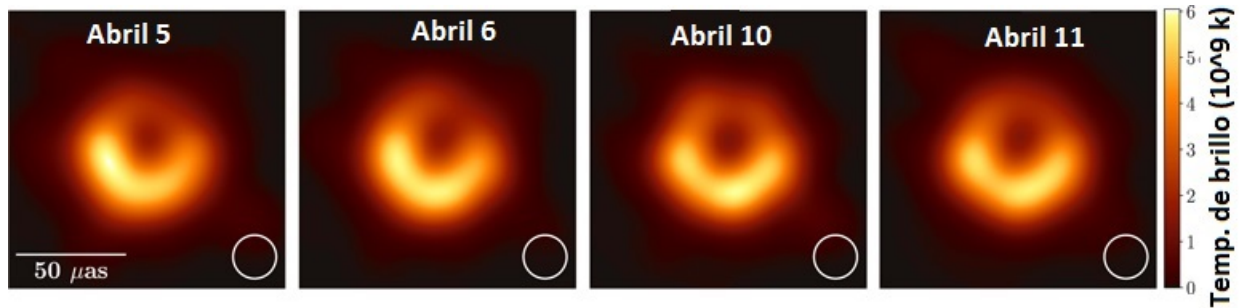
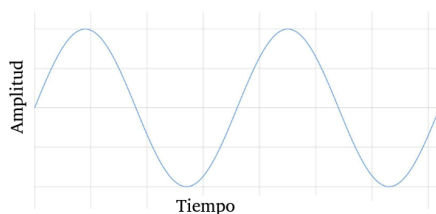


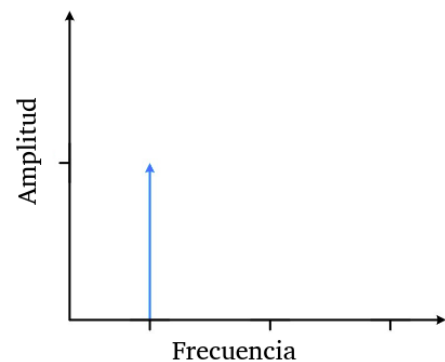
Figura 1.12: Cada imagen muestra eventos de horizonte de un agujero negro súper masivo en diferentes días de observación, obtenidos con el EHT [20].

1.4. Análisis espectral de señales

Existen señales que en el dominio temporal no podemos obtener información alguna, tal es el caso de las estrellas y los planetas al cambiar su brillo a medida que giran sobre sus ejes uno alrededor de otro, para esos casos la información que nos interesa es la frecuencia, dicha información se extrae de la Transformada discreta de Fourier. Cuando se mide una señal periódica y un número entero de periodos es la que llena el intervalo de tiempo de adquisición, al obtener la Transformada rápida de Fourier (FFT por sus siglas en inglés) de dicha medición se observa una FFT perfecta como se ve en la figura 1.13.



(a) Señal periódica en el dominio del tiempo.

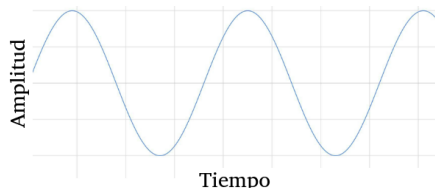


(b) Gráfica de frecuencia con una única frecuencia presente.

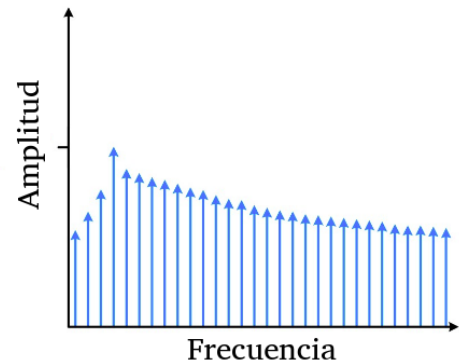
Figura 1.13: Señal periódica y continua en el dominio del tiempo y su gráfica en el dominio de la frecuencia [24].

por otro lado, no siempre la señal medida es un número entero de periodos, lo que lleva a una forma de onda trunca con diferentes características a la señal de tiempo continuo original, por lo que son discontinuas, dichas discontinuidades artificiales se muestran en la FFT como

componentes de alta frecuencia que no existen en la señal original, entonces el espectro no será el real sino una versión distorsionada, simulando que la energía en unas frecuencias se fuga a otras frecuencias conocida como fuga espectral, como se ilustra en la figura 1.14.



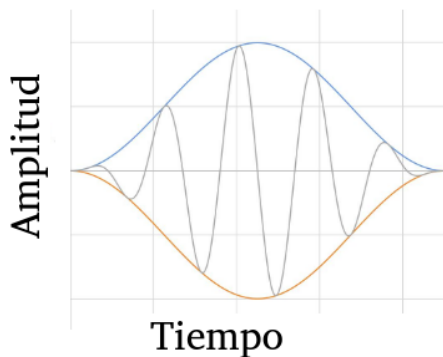
(a) Muestra de una señal con un número no entero de periodos.



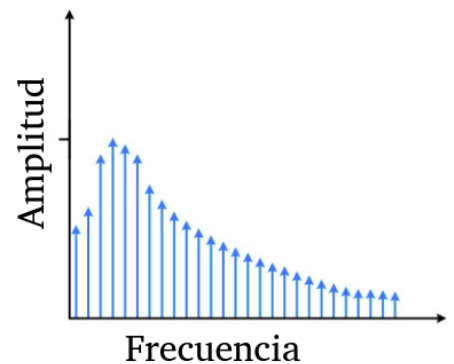
(b) Espectro de la señal con fuga espectral en la FFT.

Figura 1.14: Visualización de la fuga espectral de una señal con periodos no enteros [24].

Los efectos presentados en la figura 1.14 pueden minimizarse utilizando la técnica llamada función ventana, el resultado de dicha operación se observa en la figura 1.15, el trabajo de la ventana es reducir la amplitud de las discontinuidades en los límites de cada secuencia finita adquirida, donde multiplica el registro de la señal por una ventana de longitud finita con una amplitud que tiende a cero en los bordes, por lo que el resultado es una forma de onda continua y sin transiciones bruscas.



(a) La multiplicación de la señal con número de periodos no entero por función ventana.



(b) Espectro del resultado de la operación entre una señal y una función ventana.

Figura 1.15: Aplicación de función ventana y su espectro [24].

Algunas funciones de ventana son mostradas en la figura 1.16 donde el tipo de ventana a utilizar varía dependiendo a la aplicación a implementar, las más utilizadas en espectrómetros

son la Hamming y Hann [24].

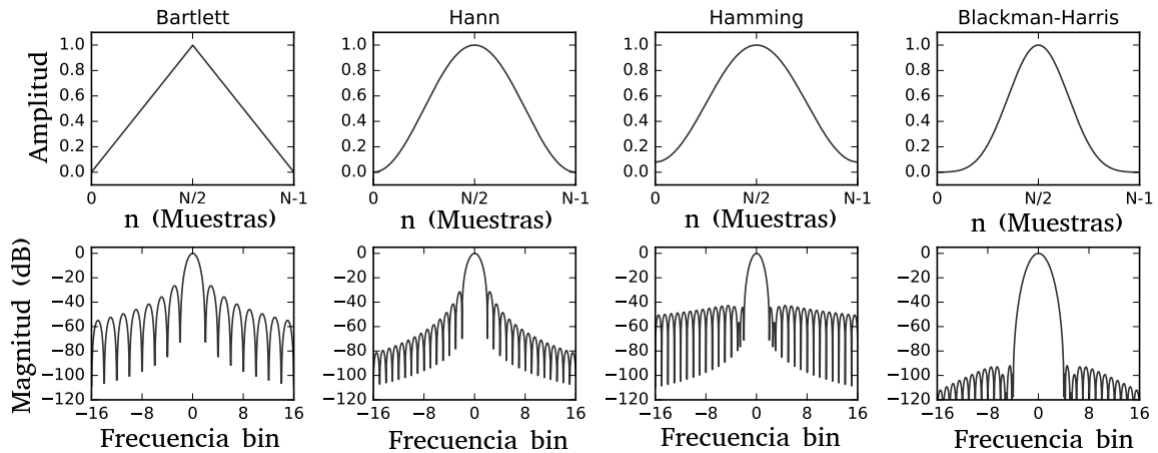


Figura 1.16: Funciones de ventana más comunes [24].

Transformada Rápida de Fourier

Una técnica matemática para la descomposición de señales en sinusoidales es el análisis de Fourier, la transformada discreta de Fourier (DFT) es parte de una familia matemática utilizada en señales digitalizadas, la transformada discreta de Fourier cambia una señal de N puntos de entrada que se encuentra en el dominio del tiempo en una señal de salida de dos puntos que son las amplitudes de las ondas coseno y seno dada en dominio de la frecuencia como se representa en la figura 1.17.

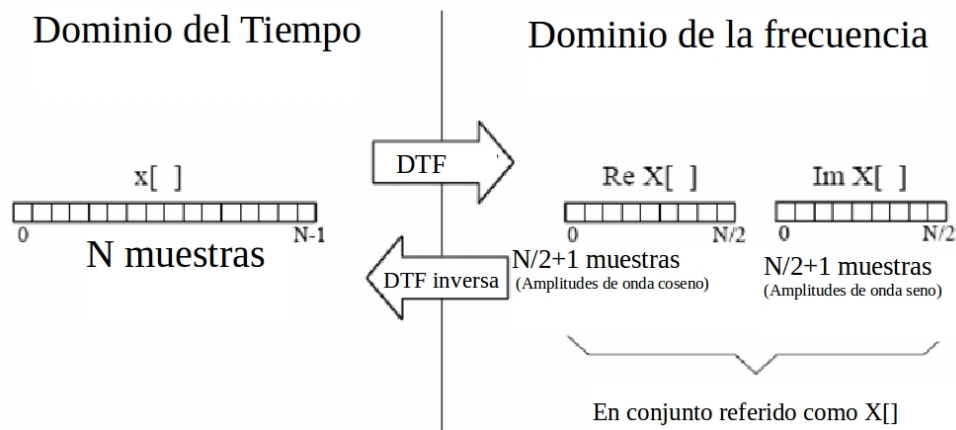


Figura 1.17: Representación de un grupo de muestras en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia [25].

$x[n]$ del lado izquierdo contiene N puntos que van desde la muestra 0 hasta $N - 1$ en el dominio del tiempo, mientras que del lado derecho está en el dominio de la frecuencia, donde se producen dos señales, la parte real denotada como: $ReX[n]$ y la parte imaginaria denotada como: $ImX[n]$, cada una de esas muestras están en el dominio de la frecuencia con $N/2 + 1$ muestras de largo, En la figura 1.18 podemos observar una DFT con $N = 128$, la secuencia que describe el comportamiento de dicha señal comprende del valor $x[0]$ a $x[127]$, por otro lado, las señales de dominio de frecuencia se encuentran especificadas en las matrices: $Re_x[0]$ a $Re_x[64]$ e $Im_x[0]$ a $Im_x[64]$ mostradas en la figura 1.19, donde se puede observar que de las 128 muestras que se tienen en el dominio del tiempo corresponden 65 puntos a cada una de las señales del dominio de la frecuencia, como se puede observar, en la imagen izquierda de la figura 1.19 el eje horizontal está representando la frecuencia por numero de muestras, mientras que para la imagen derecha de la figura 1.19 el mismo eje horizontal representa los mismos 65 puntos de frecuencia pero en una fracción de la frecuencia de muestreo. En la imagen *b*) de la figura 1.19 se observa en el eje horizontal la frecuencia como numero de muestra y en *c*) se observan las muestras en una fracción de la frecuencia de muestreo, ambas equivalen a la DFT de la señal $x[n]$ presentada en la figura 1.18 [25]

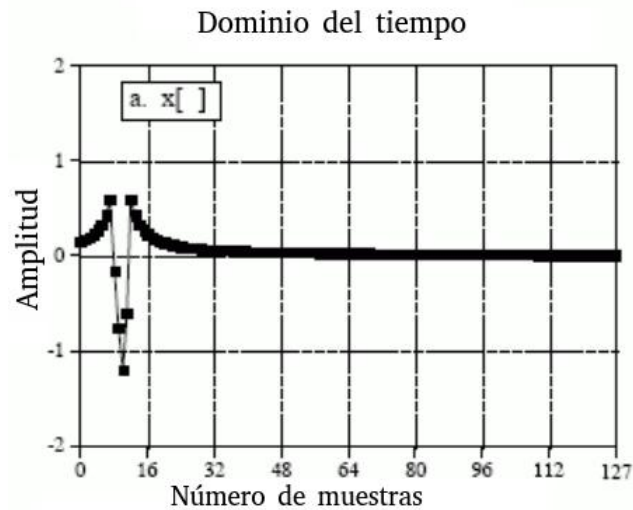


Figura 1.18: Ejemplo de una señal en el dominio del tiempo, donde $x[n]$ es un arreglo de 128 muestras [25].

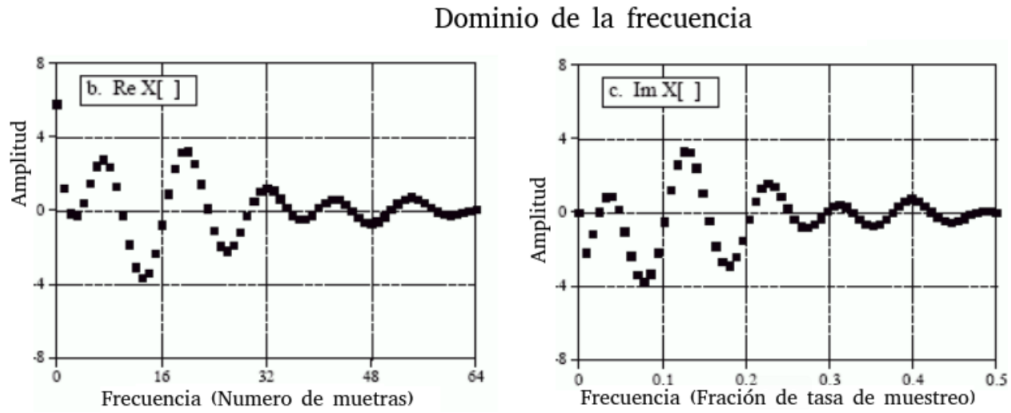


Figura 1.19: .

Una forma de mejorar la respuesta del filtro de la FFT es colocar una estructura de filtros polifásicos prototipo que incluye la multiplicación de la función ventana seguido por una FFT. Una técnica en procesamiento digital de señales para descomposición de una entrada de secuencias $x(n)$ en P subsecuencias $x_p(n)$, donde cada subsecuencia está dada por [26]:

$$x_p(n) = (\downarrow P)(z^{-p})x(n), \quad (1.7)$$

esto es conocido como descomposición polifásica y el símbolo \downarrow representa disminución de muestreo por un factor P , por lo que una señal puede ser descompuesta en P fases diferentes. Un simple ejemplo de una descomposición de una señal $x(n)$ en parte par e impar cuando $P = 2$ será:

$$x_0(n) = \{x(0), x(2), x(4), \dots\}, \quad (1.8)$$

$$x_1(n) = \{x(1), x(3), x(5), \dots\}. \quad (1.9)$$

El propósito de una interfaz de un Banco de Filtros Polifásicos (BFP) es convertir su conjunto $x_p(n)$ en P ramas polifásicas de señales filtradas $y_p(n)$ donde:

$$y_p(n) = \sum_{m=0}^{M-1} h_p(m)x_p(n-m), \quad (1.10)$$

$h_p(m)$ son coeficientes de filtrado asociado a cada ramas, M corresponde al numero de derivaciones de cada rama, la figura 1.20 ilustra la estructura de un banco de filtros polifásicos.

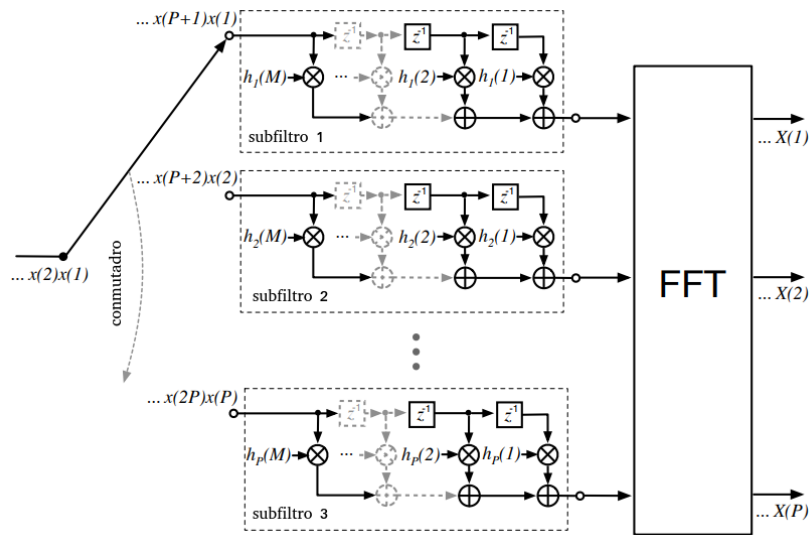


Figura 1.20: El PFB toma forma cuando una estructura de filtro FIR polifásica es combinada con un FFT [26].

Un ejemplo que muestra el proceso de las operaciones que realiza un PFB de M bloques de longitud P está descrito en la figura 1.21 con $P = 64$ puntos y $M = 4$ derivaciones polifásicas, donde la señal es dividida en M bloques y es multiplicado por la función ventana, posteriormente se suman los bloques, por último se calcula la DFT de punto P .

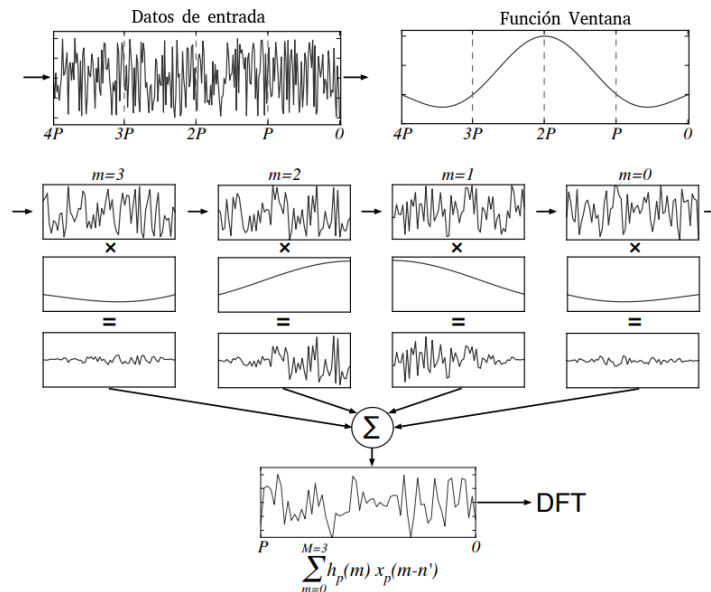


Figura 1.21: Flujo de un Banco de filtros polifásicos para una señal [26].

Supongamos que se tiene un grupo de muestras de una señal como las que se observan en la figura 1.22 y que representan una onda que viaja a través del océano, resultante de colocar un micrófono en el agua y la señal obtenida se amplifica a un nivel razonable, posteriormente se utiliza un filtro de pasa bajos para eliminar todas las frecuencias superiores a 80 Hz y poder digitalizar a una tasa de 160 muestras por segundo [25].

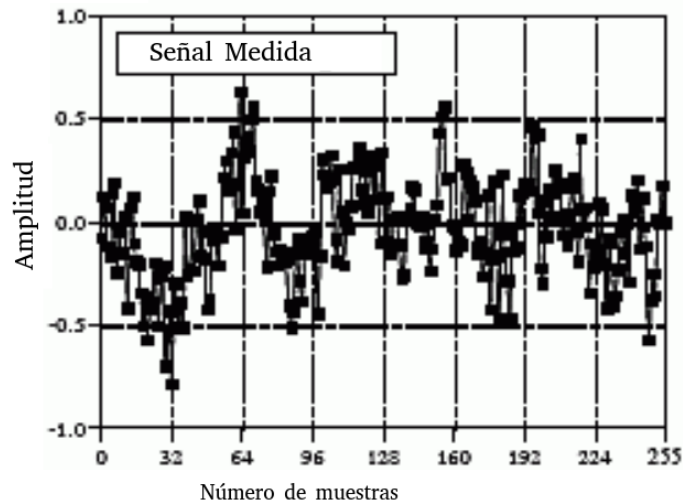


Figura 1.22: Señal de prueba para ilustrar el análisis frecuencial, dicha señal simula ondas en el dominio temporal que viajan a través del océano [25].

A partir de la gráfica anterior es difícil concluir algo, por lo que se realizan un par de pasos para un mejor análisis, comenzando por la multiplicación de la señal por una función ventana de Hamming, lo que da como resultado una señal de 256 puntos, donde las muestras de los extremos han sido reducidas en amplitud como se observa en la figura 1.23.

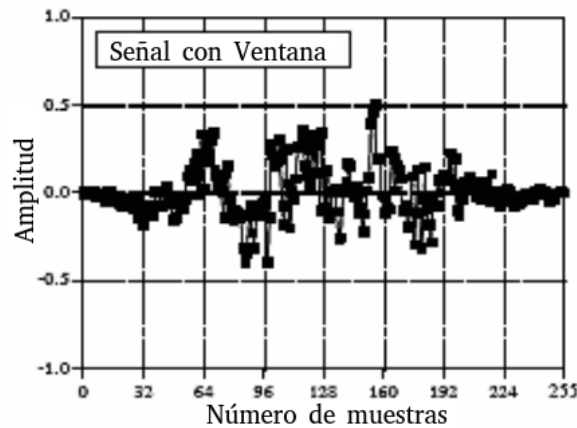


Figura 1.23: Señal resultante de multiplicar la señal original por una función ventana [25].

Al graficar los datos obtenidos de la DFT aplicada a la señal que resultó de la multiplicación de la función ventana y la señal que representa una onda que viaja en el océano obtenemos el espectro de 129 puntos, tal como se observa en la figura 1.24. El resultado de la DFT puede ser mejorada si se incrementa el número de puntos, pero aunque a mayor punto mayor información, la cantidad de muestras en el espectro diluye la información por el mismo factor, por lo que la DFT más larga proporciona una mejor resolución de frecuencia, pero el mismo nivel de ruido.

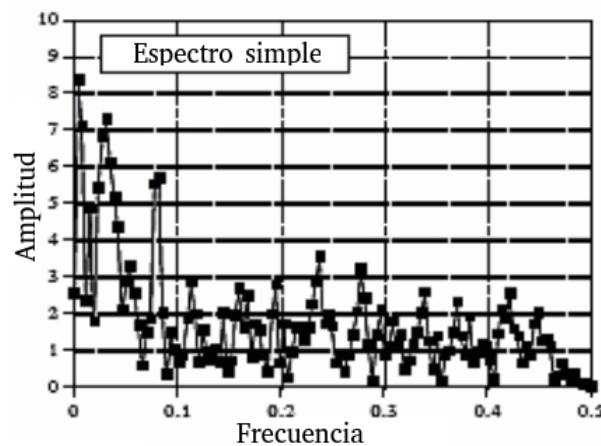


Figura 1.24: Espectro de la multiplicación de una función ventana y la señal a analizar, donde se puede observar las amplitudes de las frecuencias dominantes [25].

Una solución para mejorar el análisis es utilizar más de la señal original tal que no aumente el número de puntos en el espectro de la frecuencia, al dividir la señal de entrada en mucho segmentos de 256 puntos y cada uno de estos segmentos multiplicarlo por una ventana de

Hamming, se aplica la DFT de 256 puntos y es convertida a notación polar, todos los espectros de frecuencia resultantes son promediados para formar un solo espectro de frecuencia de 129 puntos, en la figura 1.25 se observa un ejemplo de un promedio de 100 segmentos, donde el ruido se reduce en porción a la raíz cuadrada del número de segmentos.

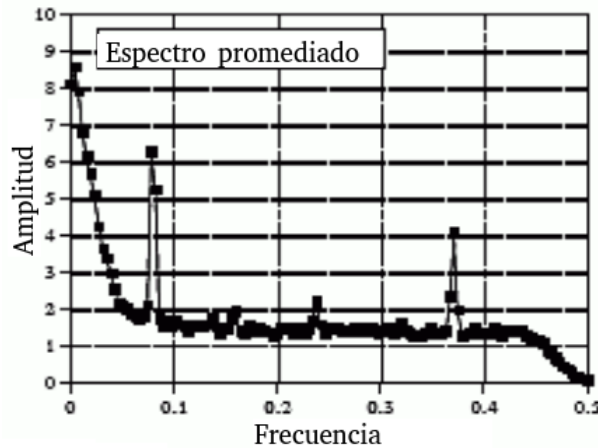


Figura 1.25: Resultado de promediar 100 de los espectros de la frecuencia tipificada [25].

Se puede observar que el ruido se ha reducido tal que es posible observar una mejor forma de las frecuencias presentes, el ruido aleatorio se ha reducido en proporción a la raíz cuadrada del número de segmentos, analizando un poco la gráfica de la figura 1.25 se muestran los datos de interés, mismos que se nombran en la figura 1.26, si se ignora por un momento los picos afilados, se puede observar una región relativamente plana, esa región corresponde al ruido blanco pues contiene una cantidad igual de todas las frecuencias, por encima de los 70 hertzios el ruido blanco disminuye rápidamente en amplitud por el resultado de la caída del filtro, por debajo de los 10 hertzios el ruido aumenta rápidamente debido al ruido $1/f^3$, analizando ahora los picos más agudos empezando por la de 60Hz que es el resultado de la interferencia electromagnética de la energía eléctrica comercial, los picos que comprenden de 10 a 100 Hz pueden ser causados por componentes en el sistema que vibran cuando se agitan llamados microfónías. Un pico fuerte a 13Hz siendo la frecuencia fundamental y picos más débiles a 26 y 39 Hz que corresponden a los armónicos, en este caso, probablemente la señal de 13Hz pudo ser producida por la hélice de tres palas de un submarino que gira a 4.33 revoluciones por segundo [25].

³El ruido llamado $1/f$ son fluctuaciones de frecuencias bajas que muestran densidad espectral de potencia inversamente proporcional a la frecuencia [27].

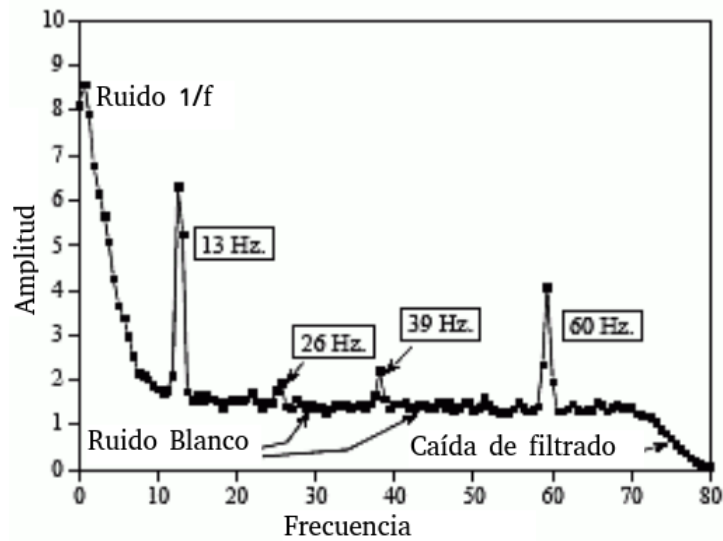


Figura 1.26: Se resaltan algunos detalles de la simulación del micrófono submarino, con características que comúnmente aparecen en los espectros de frecuencia de señales adquiridas [25].

Para poder realizar un análisis espectral de cualquier señal y especialmente una señal de muy baja potencia en radioastronomía, es esencial una electrónica capaz de amplificar y filtrar señales muy débiles, así como receptores sensibles en las frecuencias de interés. En el siguiente capítulo se presenta la teoría y características de la antena que se utiliza en el proyecto, los datos técnicos que esta presenta así como la electrónica que acondiciona y selecciona el ancho de banda que se requiere, las características más sobresalientes de la tarjeta con la que se realiza la adquisición y procesamiento de datos.

Capítulo 2

Hardware para la adquisición y procesamiento

La arquitectura de la tarjeta ROACH2 es presentada dentro de este capítulo, así como las características de la misma y del módulo ADC junto con la estructura que seguirá el procesamiento de las señales. En el presente capítulo se describen los conceptos que se requieren conocer para realizar el acondicionamiento de las señales y cuales son los principios de funcionamiento de cada dispositivo electrónico a utilizar en el proyecto, tales dispositivos serán los encargados de acondicionar y llevar las señales a procesar hasta la entrada del ADC de la tarjeta ROACH2. Muchos proyectos relacionados con adquisición de señales cósmicas optan por la eliminación del ruido proveniente de direcciones diferentes a la de interés, esto es considerando una medición normal con una potencia recibida de una fuente radioeléctrica, esta es medida como la diferencia de la salida del receptor entre la señal recibida con la antena dirigida a la fuente de interés y después con la antena desplazada para medir el nivel de fondo del cielo [28].

2.1. Teoría de antenas

“Antena es definida como un dispositivo generalmente metálico (como una varilla o cable) para irradiar o recibir ondas de radio”. Es decir se encarga de la transición de energía electromagnética desde un espacio libre a líneas de transmisión o viceversa, como muestra la figura 2.1. El modo de transmisión puede ser representado como en la figura 2.2 donde, la fuente es representada por un generador ideal V_g incluyendo su impedancia interna Z_g , la línea de transmisión es representada por una línea de impedancia $Z_A = (R_L + R_r) + jX_A$ que conecta con la antena, donde la resistencia R_L representa las pérdidas eléctricas asociadas con la estructura de la antena, mientras que R_r representa la conocida resistencia de radiación asociada con la estructura de la antena, la reactancia X_A está representando la parte imaginaria de la impedancia asociada con la radiación de la antena [29].

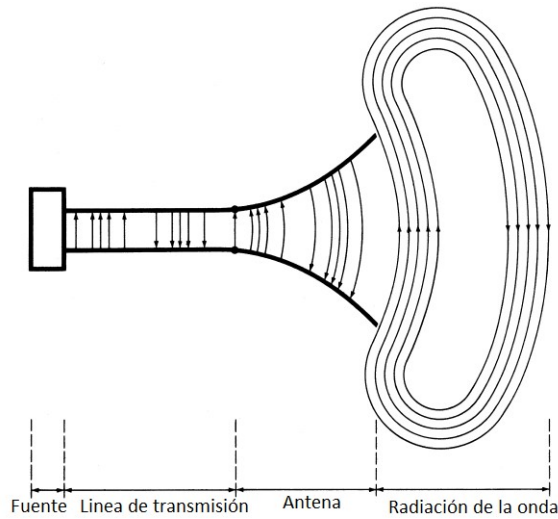


Figura 2.1: Etapas de transición de energía [29].

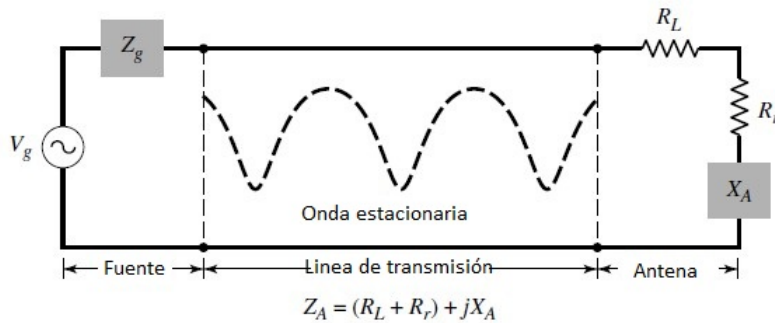


Figura 2.2: Equivalente de antena en modo de transmisión [29].

Una de las características sobresalientes de los cables conductores, es el movimiento de la electricidad, suponiendo una carga de volumen eléctrico, basado en la figura 2.3 donde su densidad de carga se representa por $q_v(C/m^3)$ y se distribuye uniformemente en el área de la sección transversal A y volumen V de un cable circular. La carga total Q con el volumen V se mueven en dirección z a velocidad uniforme $v_z(m/s)$, la densidad de corriente $J_z(\text{amperes}/m^2)$ sobre la sección transversal del cable está dada por [29]:

$$J_z = q_v v_z, \quad (2.1)$$

si el cable está hecho de un conductor eléctrico ideal, la densidad de corriente $J_s(\text{A}/m)$ reside en la superficie y está dada por:

$$J_s = q_s v_s, \quad (2.2)$$

donde $q_s(\text{C}/\text{m}^2)$ es la densidad de carga superficial, si el cable es muy delgado (idealmente cero), entonces la corriente en el cable puede representarse como:

$$I_z = q_1 v_z, \quad (2.3)$$

con $q_1(\text{C}/\text{m})$ como la carga por unidad de longitud. Si la corriente varía con el tiempo entonces la derivada de la corriente de (2.3) puede ser escrita como:

$$l \frac{dI_z}{dt} = l q_1 \frac{dv_z}{dt} = l q_1 a_z, \quad (2.4)$$

$a_z(\text{m}/\text{s}^2)$ es la aceleración y l representa la longitud del cable.

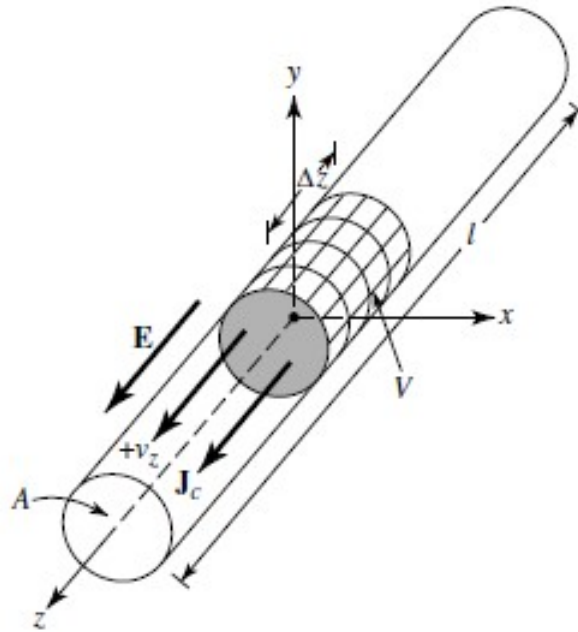


Figura 2.3: Carga uniformemente distribuida en una sección transversal de un alambre [29].

Una relación fundamental de la radiación electromagnética establece que, para crear radiación, debe haber una corriente que varíe en el tiempo a una aceleración (o desaceleración) de carga, para crear dichas aceleraciones, el cable debe ser curvado, doblado, discontinuo, terminado, o si la carga está oscilando en un movimiento de tiempo, incluso si el cable es recto, en la figura 2.4 se ilustran los casos de radiación [29].

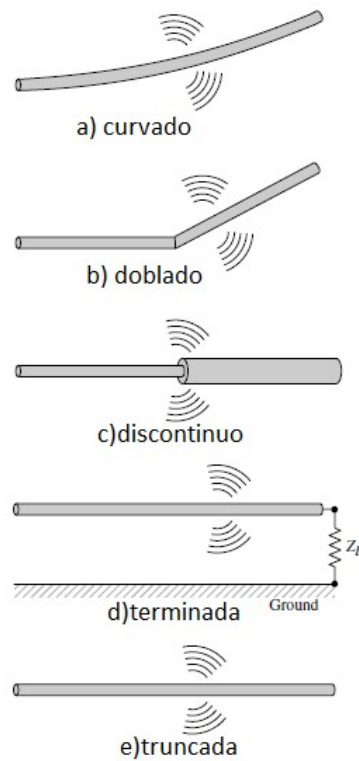


Figura 2.4: Configuraciones del alambre para radiación [29].

Al hablar de diagramas de radiación de una antena, se entiende como la representación gráfica del comportamiento de dicha antena en cuanto a los parámetros que la definen. En otras palabras, el diagrama de radiación nos indica el valor de la ganancia o la atenuación de las señales que llegan a la antena desde distintas direcciones. Un patrón de radiación presenta diferentes lóbulos de radiación, y en base a la figura 2.5, el lóbulo mayor o haz principal, representa la dirección máxima de radiación, mientras que un lóbulo menor es cualquier otro diferente al principal, los cuales representan radiación en direcciones no deseadas, un lóbulo lateral es aquél que se encuentra al lado del lóbulo principal, generalmente son más grandes que los lóbulos menores. Existen diferentes formas de radiar en las antenas, teniendo la radiación isotrópica, la cual es definida como una radiación igual en todas direcciones. Una antena direccional presenta las propiedades de radiar o recibir ondas electromagnéticas con mayor eficiencia en algunas direcciones que en otras. Los patrones omnidireccionales son definidos como aquellos que tiene patrón de radiación direccional en un plano de 2 ejes de coordenadas (idealmente), aunque presentan un pequeño porcentaje en una tercera coordenada [29].

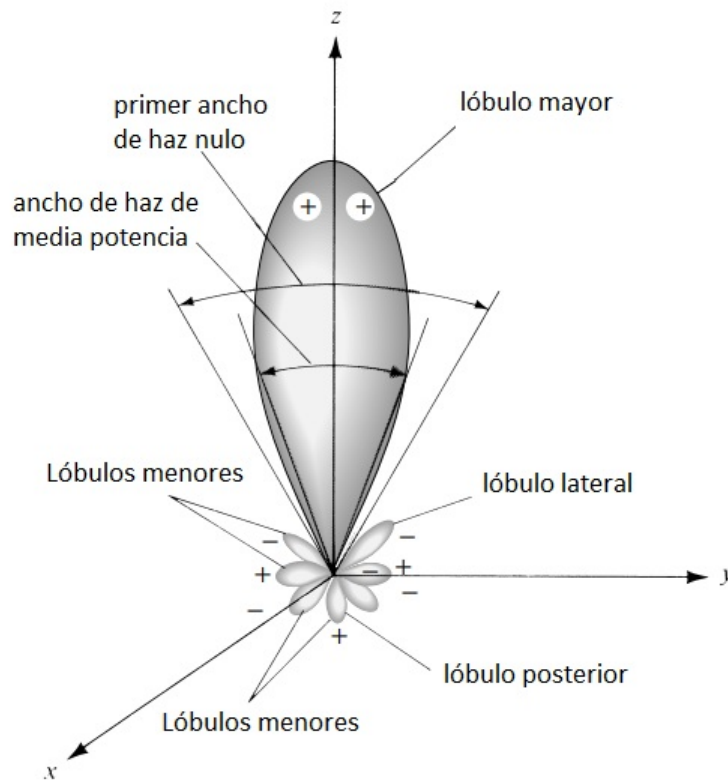


Figura 2.5: Lóbulos de radiación y anchuras de haz de un diagrama de antena [29].

La ganancia de una antena (en una dirección) está definida como la relación de la intensidad en una dirección dada y la intensidad de radiación que se obtendría si la potencia aceptada por la antena se irradia isotrópicamente. La intensidad de radiación correspondiente a la potencia radiada isotrópicamente es igual a la potencia de entrada de la antena dividida por 4π , debido a que algunas antenas radian mayor potencia en una dirección que en otras, la ganancia siempre está relacionada con el lóbulo principal y generalmente se especifica en la dirección de máxima radiación.

Si una antena tiene eficiencia de 100 %, entonces la potencia de entrada será igual a la potencia radiada por la antena, generalmente la ganancia no presenta dimensiones, pero suele expresarse en decibeles, entonces [29]:

$$G = \frac{4\pi U}{P_{in}}, \quad (2.5)$$

$$G[dB] = 10 \log G, \quad (2.6)$$

donde G es la ganancia de la antena (en su forma adimensional o en dB), U la Intensidad radiada en una dirección (W) y P_{in} es la potencia de entrada.

Por otro lado, al hablar de la impedancia de una antena nos referimos a la impedancia de entrada en un par de terminales en la entrada de la antena, como muestra la figura 2.6, la relación del voltaje a la corriente en estos terminales, sin carga conectada, define la impedancia como [29]:

$$Z_A = R_A + jX_A, \quad (2.7)$$

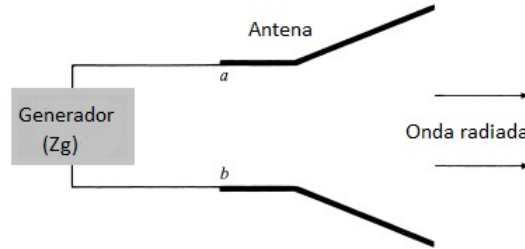


Figura 2.6: impedancia de entrada en un par de terminales, a y b [29].

donde Z_A es la impedancia de la antena en las terminales a-b (Ω), R_A la resistencia de la antena en las terminales a-b (Ω) y X_A es la reactancia de la antena en las terminales a-b (Ω), en general, la parte resistiva, tiene dos componentes:

$$R_A = R_r + R_L, \quad (2.8)$$

con R_r como la resistencia a la radiación de la antena y R_L es la resistencia a las pérdida de la antena.

El generador que se observa en la figura 2.6 contiene una impedancia interna dada por:

$$Z_g = R_g + jX_g, \quad (2.9)$$

R_g representa la resistencia de la impedancia del generador (Ω) y X_g la reactancia de la impedancia del generador (Ω).

Por lo que la máxima transferencia de energía se produce cuando tenemos coincidencias conjugadas, es decir:

$$\begin{aligned} R_r + R_L &= R_g, \\ X_A &= -X_g. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Para el caso donde la antena es usada en el modo de recepción como en la figura 2.7, la onda que incide sobre la antena induce una tensión V_T que es análoga a la tensión pico del generador (para el caso de uso como transmisora). La impedancia de entrada de una antena es generalmente una función de frecuencia, por lo que la antena se adaptará a la línea de transmisión de interconexión y otros equipos asociados sólo dentro de un ancho de banda, además, la impedancia de entrada

de la antena dependen de muchos factores, como la geometría, su método de excitación y la proximidad a los objetos circundantes [29].

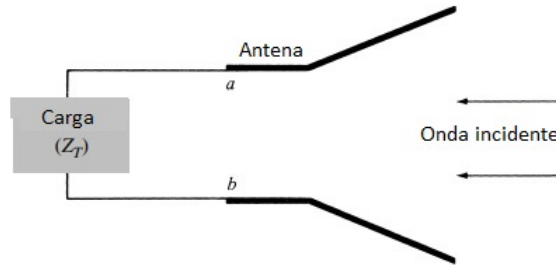


Figura 2.7: Antena como receptor [29].

Lineas de transmisión

Para poder guiar la energía de radiofrecuencia desde un punto a otro, se utiliza un dispositivo para cumplir el objetivo, llamado línea de transmisión, normalmente se encuentra representada como una línea de dos hilos para la propagación de las ondas electromagnéticas como se observa en la figura 2.8.

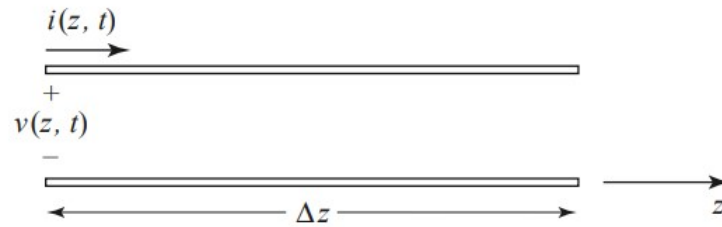


Figura 2.8: Representación de líneas de transmisión, con definición de voltaje $v(z, t)$ y corriente $i(z, t)$ [30].

La pieza de línea de transmisión con longitud infinitesimal z , puede ser modelado como un circuito de elementos concentrados como se muestra en la figura 2.9.

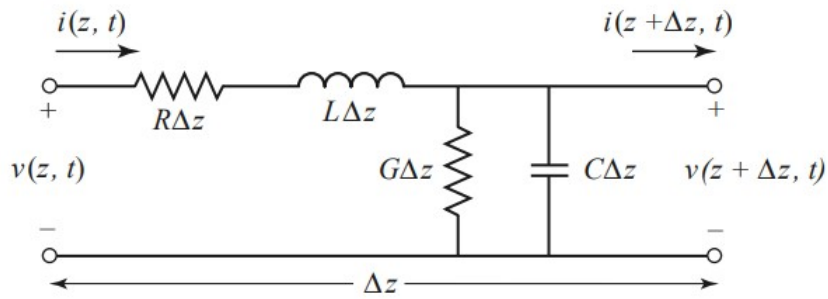


Figura 2.9: Circuito equivalente para la línea de transmisión [30].

Donde R representa la resistencia en serie por unidad de longitud por metro para ambos conductores, L es la inductancia en serie por unidad de longitud para ambos conductores, en H/m, G es la conductancia de derivación por unidad de longitud, dado en S/m y C es la capacitancia en derivación por unidad de longitud, en F/m.

La razón de la presencia de inductancia es por la autoinducción total de los conductores, para la capacitancia se debe a la proximidad de los dos conductores, mientras que para la resistencia en serie representa la resistencia debido a la conductividad finita de la línea, por último, la conductancia se debe a la pérdida dieléctrica en el material entre los conductores, por lo que representa pérdidas [30].

2.1.1. Antena receptora

En SCI-HI la antena como elemento receptor se encuentra en la primera etapa del proceso para captar la señal a analizar, por lo que se requiere una antena que cumpla con las características necesarias para el análisis de las frecuencias relacionadas a Hidrógeno Neutro de 21 cm, como sabemos, dichas señales son recibidas en la tierra con un desplazamiento al rojo, lo cual, son medibles en el intervalo de frecuencias centrada en 80 MHz, por lo que se debe utilizar una antena con el ancho de banda centrado en dicha frecuencia y con gran sensibilidad a la radiación electromagnética, pues las señales que se pretenden captar son de amplitudes muy bajas. La antena a utilizar es llamada mango peel y se observa en la figura 2.10, la cual consta de 4 pétalos ensamblados formando 2 dipolos cruzados, el diseño fue creado por el equipo de trabajo SCI-HI y la caracterización es realizada en un tema de tesis en desarrollo titulado "Integración de la antena mango peel en un radiómetro para el proyecto SCI-HI" [31].

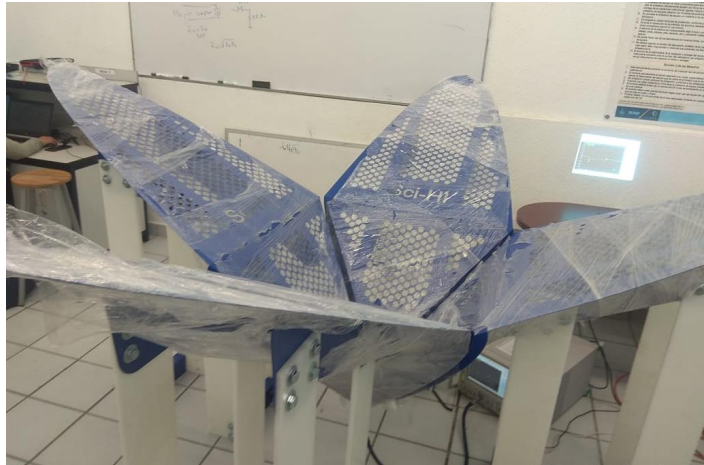


Figura 2.10: Antena Mango peel formada por 4 pétalos metálicos ensamblados, la separación entre los pétalos y ángulos de inclinación de cada pétalo es específico.

El diagrama de radiación de dicha antena corresponde al mostrado en la figura 2.11, donde se puede apreciar que su patrón de radiación obedece a una antena direccional con un ancho de lóbulo principal que va desde los 60.5° a los 70.5° , dicha apertura varía en función de la frecuencia captada, así mismo se observa el coeficiente de reflexión en la figura 2.12, donde se puede apreciar una respuesta uniforme dentro del ancho de banda que va de los 70MHz hasta un poco antes de los 120MHz, una de las razones por las cuales se acotan las frecuencias de observación son por el ancho de banda del coeficiente de reflexión que tiene la antena, la cual se considera aceptable por debajo de los -12dB.

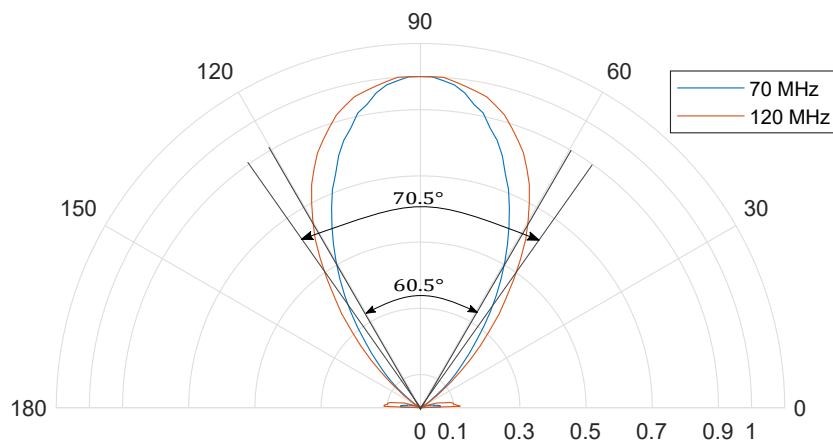


Figura 2.11: Diagrama de radiación de la antena Mango peel [31].

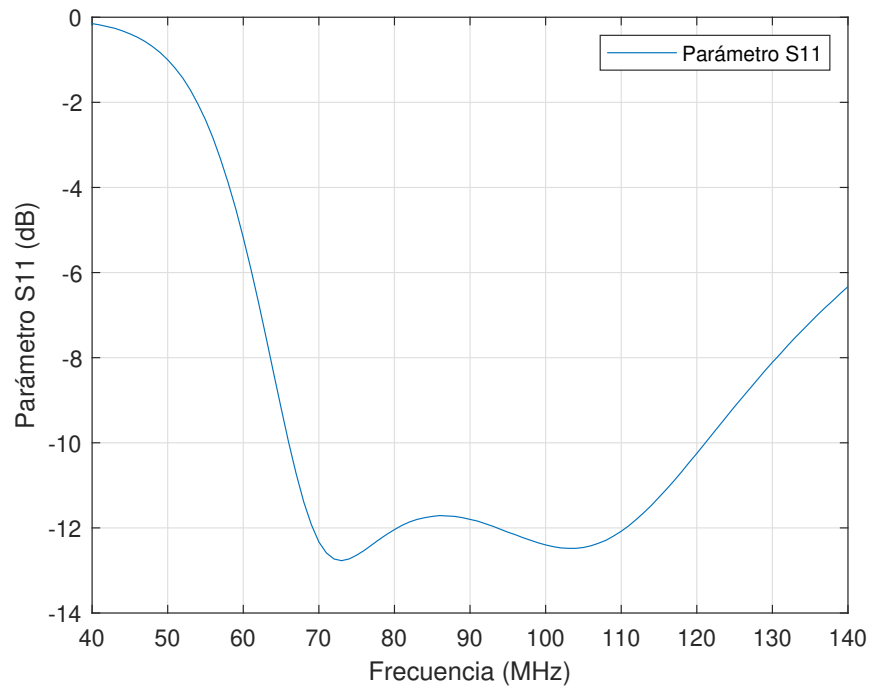


Figura 2.12: Coeficiente de reflexión, se toman como frecuencias aceptables a todas aquellas en las que el parámetro S11 caigan por debajo de -10dB [31].

2.2. Filtrado de señales

Un filtro es una red de dos puertos que son usados para el control de la respuesta de frecuencias en un sistema de microondas, cuando la frecuencia se encuentra dentro de la banda de paso deja pasar la señal, mientras que atenúa fuera de la banda de operación del filtro, consiste en una línea de transmisión cargada periódicamente con elementos reactivos [30], entonces es posible utilizar filtros para limitar el espectro de frecuencias de una señal en ciertas bandas de frecuencias específicas, podemos encontrar filtros en los circuitos que se utilizan en los receptores de radio y televisión, que ayudan a sintonizar una señal deseada entre una multitud. Un filtro es pasivo si está conformado únicamente de elementos pasivos tales como resistencias, inductores y capacitores, y activo si lo conforma electrónica analógica, en ocasiones se utilizan filtros en redes de acoplamiento de impedancia.

Un filtro pasa bajas común se forma cuando la salida del mismo se toma la señal del capacitor tal como se muestra en la figura 2.13.

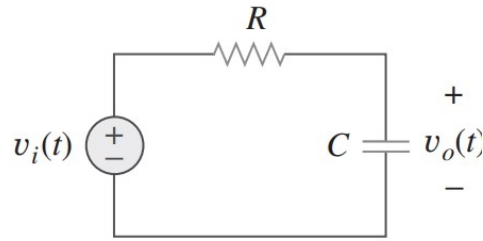


Figura 2.13: Circuito eléctrico de un filtro pasa bajas pasivo [32].

La función de transferencia de éste tipo de filtros en términos de la frecuencia (w) viene dada por su resistencia y capacitancia sustituida por su impedancia como:

$$H(w) = \frac{v_o}{v_i} = \frac{1}{1 + jwRC}, \quad (2.11)$$

la frecuencia de corte (w_c) es aquella donde la función de transferencia $H(w)$ disminuye en magnitud hasta 70.71 % de su valor máximo, en el contexto de filtros por lo general se obtiene igualando la magnitud $H(w)$ a $\frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0.707$ entonces:

$$H(w_c) = \frac{1}{\sqrt{1 + w_c^2 R^2 C^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad (2.12)$$

por lo que la frecuencia de corte:

$$w_c = \frac{1}{RC}. \quad (2.13)$$

Por otro lado el filtro pasa altas se forma cuando la salida de circuito RC se toma de la resistencia como se observa en la figura 2.14,

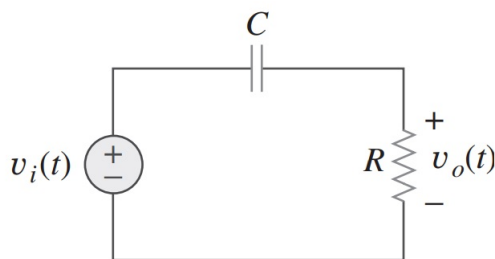


Figura 2.14: Circuito eléctrico de un filtro pasaaltas pasivo [32].

la función de transferencia viene dada por:

$$H(w) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{jwRC}{1 + jwRC}, \quad (2.14)$$

para éste caso, la frecuencia de corte también está dada por:

$$w_c = \frac{1}{RC}. \quad (2.15)$$

Para el propósito de este trabajo se han seleccionado dos filtros pasivos, un pasa bajas y un pasa altas con el fin de formar una banda de paso, donde el ancho de banda comprenda nuestro intervalo deseado de 40-120MHz. El primer dispositivo seleccionado es el filtro pasa altos SPH-25+ ilustrado en la figura 2.15 con una impedancia de acoplamiento de 50 ohm, frecuencia de corte de 27.5 MHz, en la figura 2.16 se presentan las pérdidas que se generan por la inserción del dispositivo, así también se muestran las perdidas por retorno en la figura 2.17, dicha pérdida es una proporción de la señal que se refleja, principalmente por el desajuste de impedancias [33], ambos tipos de pérdidas están en función a la frecuencia que trabajen.



Figura 2.15: Dispositivo seleccionado, filtro pasa altas SPH-25+ [34].

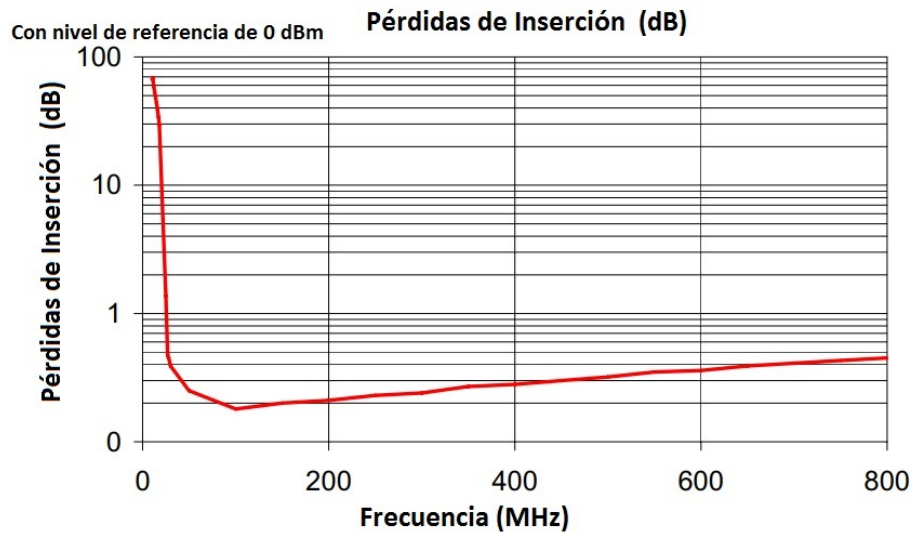


Figura 2.16: Gráfica de pérdidas de inserción del filtro pasa altos SPH-25+ [34].

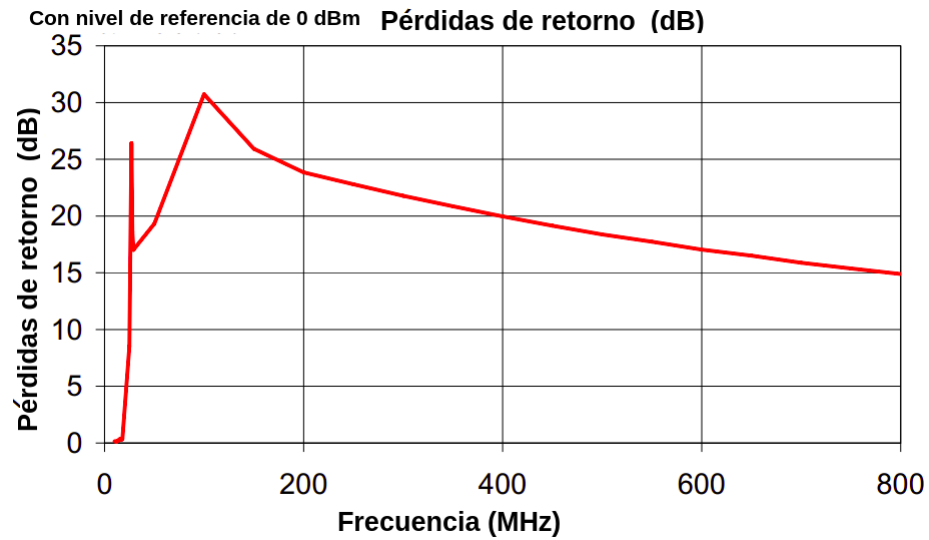


Figura 2.17: Gráfica de pérdidas de retorno del filtro pasa altos SPH-25+ [34].

El segundo dispositivo es el SLP-100+ que corresponde a un filtro pasa bajas con impedancia de acoplamiento de 50 Ω y frecuencia de corte de 120 MHz, muy similar físicamente al pasa altas, el dispositivo se muestra en la figura 2.18, las pérdidas de inserción y pérdidas de retorno se muestran en la figura 2.19 y figura 2.20 respectivamente, aunque la frecuencia de corte de este filtro se ajusta exactamente a la frecuencia de corte alta de nuestra banda de paso propuesto, cabe mencionar que dada la frecuencia máxima en la que la antena presenta sensibilidad aceptable es por debajo de los 120 MHz, el extremo superior de la banda de paso se podría observar variaciones de respuesta como pérdidas de potencia.



Figura 2.18: Dispositivo seleccionado, filtro pasa bajas SLP-100+ [35].



Figura 2.19: Gráfica de pérdidas de inserción del filtro pasa bajos SLP-100+ [35].

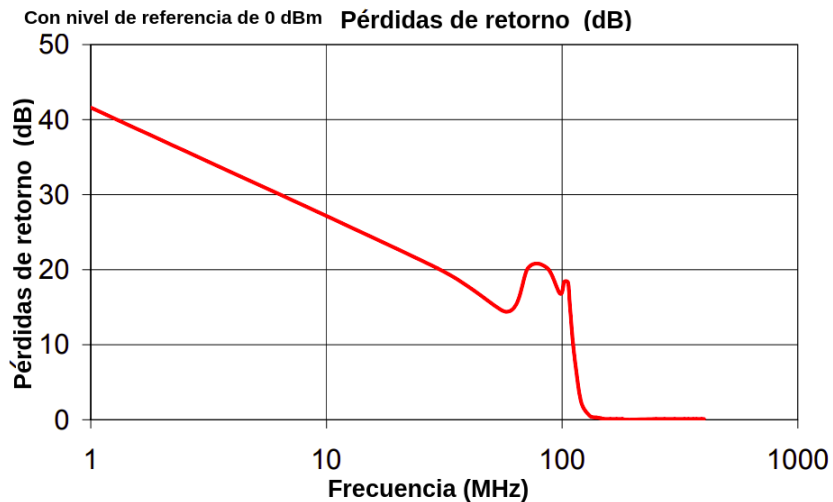


Figura 2.20: Gráfica de pérdidas de retorno del filtro pasa bajos SLP-100+ [35].

2.3. Amplificación de señales

Una parte esencial para la recepción de señales en altas frecuencias son los amplificadores de bajo ruido (Low Noise Amplifier), que generalmente son ubicados en la salida de la antena receptora y la principal función es elevar el nivel de la señal recibida, con la característica de introducir el menor ruido eléctrico, esto es esencial, pues la señal recibida es de muy baja potencia por lo que el ruido que produzca un amplificar podría hacer que la señal se perdiera, el ruido eléctrico más común que se introduce en los sistemas electrónicos de acoplamiento es

producido por ruido térmico, donde la potencia de ruido es proporcional a la temperatura de los elementos electrónicos que lo generan.

El amplificador seleccionado para el desarrollo del proyecto es un ZX60-33LN-S+, el cual tiene un ancho de banda de amplificación de 50Hz a 300 MHz y una resistencia de acoplamiento de 50 ohm, en la figura 2.21 se puede observar la respuesta en frecuencia del dispositivo, la línea continua (roja) corresponde al a respuesta con una alimentación del dispositivo de 5V, mientras que la línea discontinua (azul) corresponde al a respuesta con un voltaje de alimentación de 3V.

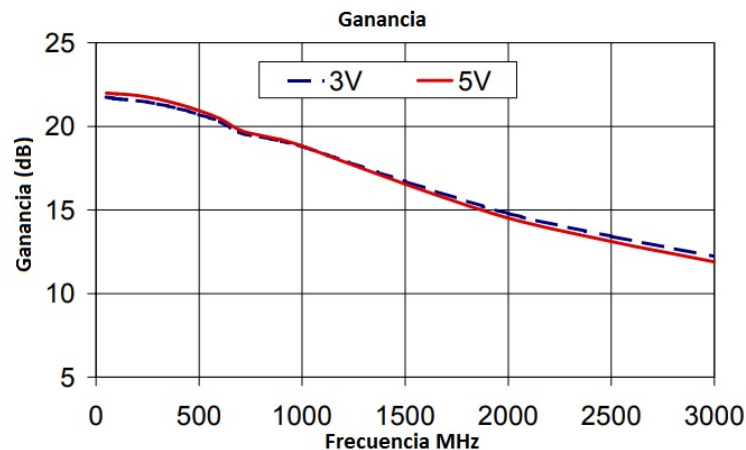


Figura 2.21: Gráfica de operación del amplificador ZX60-33LN-S+ en su ancho de banda [36].

Dicho amplificador de bajo ruido tiene aplicaciones típicas en recepción de señales de GPS y bluetooth, lo que lo hace ideal para tomar señales débiles de la antena, generalmente las señales cósmicas se encuentran inclusive por debajo de -100dBm, en la figura 2.22 se muestra la imagen del amplificador mencionado.

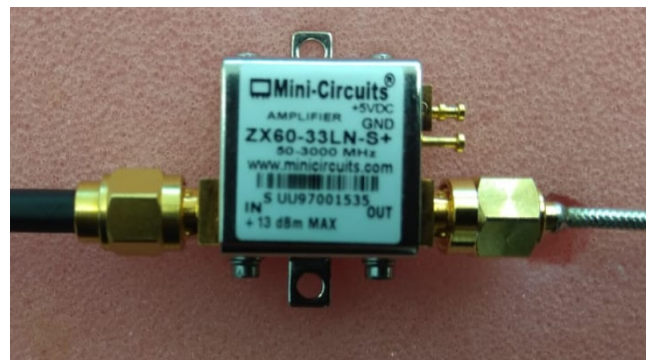


Figura 2.22: Dispositivo amplificador ZX60-33LN-S+.

2.4. Tarjeta ROACH2

La tarjeta ROACH2 es una placa de procesamiento basada en un FPGA de Xilinx de la serie Virtex 6, dicha tarjeta es presentada en la figura 2.23, figura 2.24 y figura 2.25; Las FPGA son un circuito integrado reconfigurable que consiste en una matriz de bloques lógicos programables e interconexiones reconfigurables, esta incluye bloque RAM (BRAM) y bloques de memoria distribuidos en todo el FPGA.

ROACH2 cuenta con 2 slot para tarjetas intermedias e integrar ADC de alta calidad, el principal objetivo de su diseño es implementar sistemas de recepción y procesamiento de señales, que implica la aplicación más exigente en radioastronomía. Una de las principales características de la tarjeta es el código de programación, ya que no se realiza directamente en lenguaje HDL, sino que mediante bloques de Simulink.



Figura 2.23: Vista superior de la tarjeta ROACH2, donde se aprecia la electrónica integrada al sistema.



Figura 2.24: Vista frontal de la tarjeta ROACH2, aquí se encuentra el control de encendido (botón negro), reset de Hardware y software (botón rojo) además de leds indicadores programables.



Figura 2.25: Vista posterior de la tarjeta ROACH2, se pueden observar conectores USB y ethernet para la comunicación, conector para alimentación de línea y conectores que pueden ser usados para ingresar señales.

En la tabla 2.1 se presentan las principales características de la tarjeta, donde se puede observar las formas de interacción y comunicación, además de contar con un sistema de protección.

FPGA	
1	Xilinx Virtex-6 SX475T
Interfaces	
2	Z-DOK conectores de par diferencial
6	GPIO
1	conector DDR3 72-bit
Periféricos	
1	RS-232 usb
1	Ethernet rj45 1Gbit
1	conector DDR3 72-bit
Monitoreo y manejo de los sistemas	
1	Monitoreo de temperatura
Voltaje aux.	12v, 5v, 3.3v, 2.5v, 1.8v, 1v, 1.2v
1	Apagado automático ante eventos de temperatura y sobre tensión

Tabla 2.1: Características de interfaz y comunicación de la ROACH2.

Para la comunicación con la tarjeta ROACH2 es necesario una asignación de dirección IP fija a la placa, por lo que se realiza el ajuste mediante una conexión USB, a través de minicom,

al haber asignado una IP dentro del segmento a trabajar, se establece una conexión mediante el puerto 7147 de Telnet, la transferencia de archivos mediante flujo de bits la realiza por el puerto 7148.

2.5. Módulo ADC

Un conversor ADC (por sus siglas en ingles Analog-to-digital converter) ideal convierte una señal de tiempo continuo en una señal discreta, es decir, realiza la conversión en secuencias de muestras de precisión finita o cuantificadas, los ADC son un dispositivo físico que convierte una amplitud de tensión que a el entra a un código binario que representa la amplitud cuantificada más cercana. En la figura 2.26 se muestra la configuración que realiza la conversión del un ADC, La secuencia que realiza la conversión del ADC comienza con la entrada de una señal $x_a(t)$ a una etapa llamada muestreo y retención ya que cada conversión no es instantánea, quien toma una muestra cada periodo de T segundos y mantiene el valor durante todo el periodo, en el mismo instante se realiza la conversión, quien devuelve una señal binaria $\hat{x}_B[n]$, donde n representa el numero de muestras cuantificadas [37].

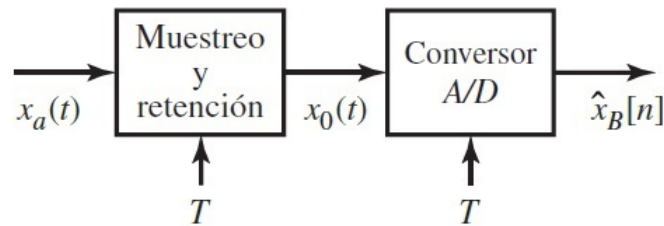


Figura 2.26: Configuración de un convertidor ADC [37].

El módulo de ADC compatible con la placa ROACH2 que se muestra en la figura 2.27, etiquetado como ADC2x14-400 está acondicionada con el Circuito Integrado ADS54RF63I.

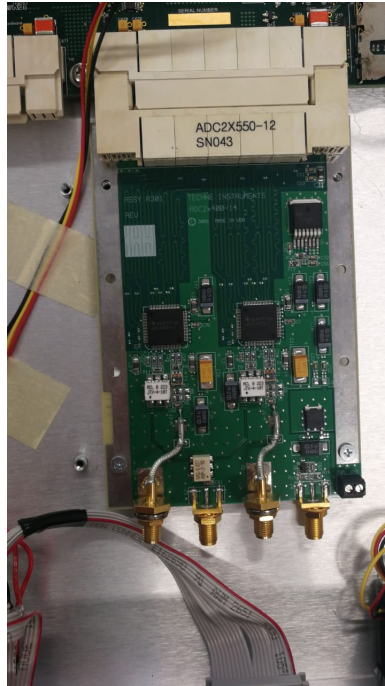


Figura 2.27: Módulo ADC2x550-12 para la conversión ADC.

El ADC ADS54RF63I cuenta con 4 núcleos para muestreo, y cada uno funciona a $\frac{1}{2}$ de la frecuencia del reloj de entrada, desfasado 1 ciclo de reloj de entrada para segundo núcleo, dos ciclos de reloj para el tercer núcleo y tres ciclos de reloj para el cuarto núcleo, en la tabla 2.2 se observa la configuración del ADC.

Bits de resolución	14 bits
Frecuencia de Muestreo (Fs)	400MHz
Entrada diferencial	2.2V _{pp}
Núcleos de muestreo	4
Frecuencia de muestreo por núcleo	$\frac{1}{2}$ de Fs

Tabla 2.2: Características principales del ADC2x14-400 [38].

El bloque de ADC en Simulink arroja el almacenamiento de 4 muestras, por lo que se requiere esperar 4 ciclos de reloj para recopilar los datos, entonces la frecuencia de operación de la FPGA debe estar a $\frac{1}{4}$ de la frecuencia del ADC, para poder sincronizar el ADC y la FPGA la señal de reloj con la que trabaja la FPGA es heredada de la señal de reloj del ADC, entonces el proceso de muestreo sigue la secuencia de la figura 2.28, donde la señal de reloj Fs es la frecuencia de partida para el muestreo, el ADC tiene 4 núcleos, por lo que se debe esperar 4 Fs para completar un registro de muestreo que contempla 4 muestras, la línea punteada azul

representa $F_s=400\text{MHz}$, mientras que las punteadas rojas representan la frecuencia de muestreo de cada núcleo que es 4 veces más lenta que F_s , es decir core1 , core2 , core3 , $\text{core4}=\frac{1}{4}F_s$ con un retardo de 1 F_s entre core1 y core2 , 1 F_s entre core2 y core3 , y un retardo de 1 F_s entre core3 y core4 .

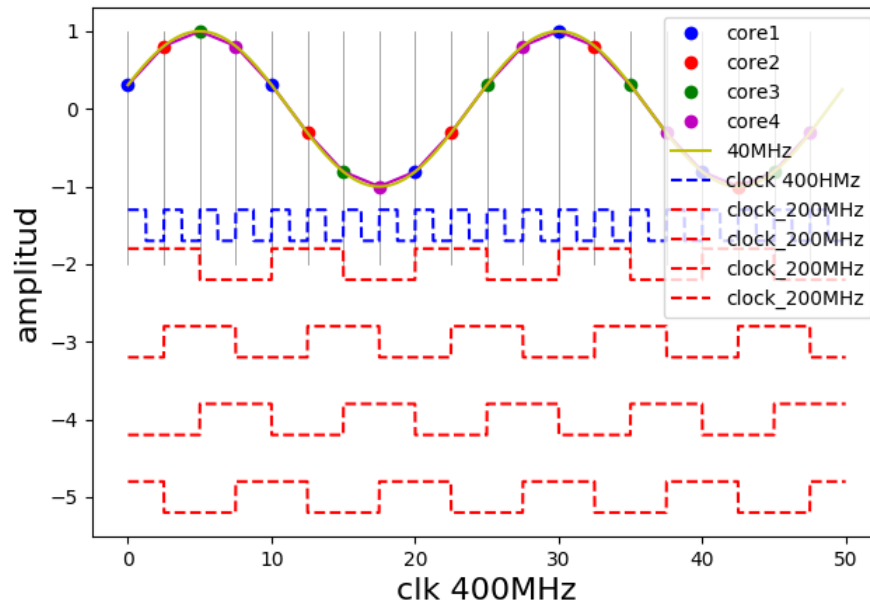


Figura 2.28: Visualización del muestreo de una señal y herencia de señal de reloj.

Para la operación y programación de la ROACH2 y su ADC es necesario la ambientación de una PC con características específicas de Software, que sin ello es imposible su operación, en el siguiente capítulo se abarcan las herramientas y requerimientos que se deben cumplir en el acondicionamiento de la PC, y como se implementa el firmware del interferómetro que ejecuta la ROACH2.

Capítulo 3

Ambiente CASPER y diseño del interferómetro

CASPER es el acrónimo del inglés Collaboration for Astronomy Signal Processing and Electronics Research, el cual tiene como objetivo simplificar el flujo de diseño de la instrumentación de Radioastronomía a través del desarrollo de hardware y software de fuente abierta y plataforma independiente. En este capítulo se presenta el ambiente con el que se trabaja para poder realizar la programación de la tarjeta ROACH2, se revisan los principales diagramas de bloques con los que se cuenta dentro de la librería CASPER para Simulink, así como el proceso de creación y carga del firmware que implementa el interferómetro en la tarjeta.

3.1. Ambientación de Software

El software necesario para el trabajo y programación de la tarjeta ROACH2 se divide en dos herramientas necesarias, el MSSGE Toolflow y las herramientas de control y comunicación, el toolflow por las abreviaturas que significan MATLAB/ Simulink/ System Generator/ EDK, se reduce al conjunto de herramientas para el desarrollo Casper basado en FPGA, las librerías que se encuentran dentro de la carpeta xps.library fueron desarrolladas en el centro de investigaciones inalámbricas en Berkeley, la figura 3.1 muestra los directorios y archivos que forman parte de las librerías, aquí se encuentran las librerías de los bloques para Simulink y el script startsg que enlaza dichas librerías, con el objetivo de proporcionar una herramienta de alto nivel para las plataformas Roach y demás tarjetas de su desarrollo, presentado como un entorno gráfico de MATLAB/Simulink con Xilinx System Generator Toolbox.

```

ulloo@ulloo-SVT11115FLS: ~/Documentos/mlib_devel-master
ulloo@ulloo-SVT11115FLS:~/Documentos/mlib_devel-master$ ls
casper_library  proyectos          startsg.local.example.save  untitled_sysgen.log
CODE_OF_CONDUCT.md  README.md        startsg.save                xps_library
docs             startsg           startup.m                   xps_sw_support
jasper_library    startsg.local    untitled.slx.autosave
ledi_sysgen.log  startsg.local.example  untitled_sysgen_error.log
ulloo@ulloo-SVT11115FLS:~/Documentos/mlib_devel-master$

```

Figura 3.1: Rama maestra de librerías CASPER.

Cabe mencionar que no todas las versiones tanto de MATLAB como de xilinx son funcionales para nuestro propósito, por lo que las versiones recomendadas y en uso son las mostradas en la tabla 3.1:

Software	versión
S.O. Linux	Ubuntu 14.04
MATLAB	2013b
Libreria Casper	mlib_devel
Xilinx EDK	14.7
Xilinx System Generator	14.7

Tabla 3.1: Software y Versiones necesarias para la programación de ROACH2.

Para añadir las librerías de CASPER dentro del entorno Simulink, es necesario tener el control de la instalación previa de MATLAB y xilinx para poder manipular las rutas, permisos y agregar los path dentro de los script de lanzamiento, la figura 3.2 muestra como al lanzar el script principal nos muestra las rutas que se configuraron para ligar los binarios de cada software, después de un momento de inicialización se abre la ventana principal de MATLAB, por último se abre simulink, en la figura 3.3 se observa que los bloques dedicados en Simulink ya se encuentran cargados.

```

ulloo@ulloo-SVT11115FLS: ~/Documentos/mlib_devel-master
ulloo@ulloo-SVT11115FLS:~/Documentos$ cd mlib_devel-master/
ulloo@ulloo-SVT11115FLS:~/Documentos/mlib_devel-master$ ls
casper_library      README.md          startup.m
CODE_OF_CONDUCT.md startsg             untitled.slx.autosave
docs                startsg.local      untitled_sysgen_error.log
jasper_library      startsg.local.example  untitled_sysgen.log
ledi_sysgen.log     startsg.local.example.save  xps_library
proyectos           startsg.save       xps_sw_support
ulloo@ulloo-SVT11115FLS:~/Documentos/mlib_devel-master$ sudo ./startsg
[sudo] password for ulloo:
Reading local definitions from './startsg.local'
Using MATLAB_PATH=/opt/MATLAB/R2016b
Using XILINX_PATH=/opt/Xilinx/Vivado/2016.2
Using PLATFORM=lin64
Using MLIB_DEVEL_PATH=/home/ulloo/Documentos/mlib_devel-master
Using JASPER_BACKEND=vivado
cp: no se puede efectuar 'stat' sobre '/opt/Xilinx/Vivado/2016.2/lib/lnx64.o:/opt/Xilinx/Vivado/2016.2/lib/lnx64.o/libstdc++.so.6': No existe el archivo o el directorio
Configuring MATLAB runtime using Xilinx Supplied .matlab7rc.sh file copied to your home directory

```

Figura 3.2: Lanzamiento de script `startsg`, que abre MATLAB y enlaza las librerías CASPER a Simulink.

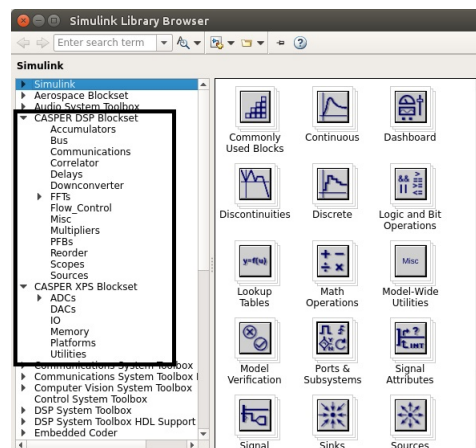


Figura 3.3: Al correr el script `startsg` se puede apreciar como aparecen los bloques CASPER enlazados a Simulink.

Cabe resaltar que el proceso de ambientación no es nada trivial, por lo que es necesario el conocimiento en líneas de comando para linux con el objetivo de generar permisos de usuarios y archivos, generar y modificar scripts y navegación por los directorios.

CASPER recomienda el uso de python y las librerías Corr como herramienta de control y comunicación, librerías que fueron creadas por el equipo de SKA ¹ para dichas funciones, la versión con la que se trabaja (en la que fueron compiladas las librerías) es la 2.7, misma que se instala con una serie de comandos en terminal, para el uso de python es necesario crear los códigos de programación en un editor de texto y su compilación mediante terminal, debido a las dependencias de todo el ambiente anterior no es posible instalar un IDE de programación.

¹Square Kilometer Array, arreglo de alrededor de un kilómetro cuadrado [39].

3.2. Flujo del modelado MATLAB-Simulink

Existe un flujo de diseño que se sigue para la implementación de un modelo de procesamiento que se muestra en la figura 3.4, el cual consiste en crear un diseño mediante Simulink, posteriormente MATLAB realiza la generación del archivo HDL a compilar, si el diseño no cuenta con errores es creado el archivo de extensión .bof el cual se carga a la ROACH2, por último se realiza el control y comunicación mediante scripts generados en Python, se realizan las pruebas y si es necesario se reajusta el diseño.

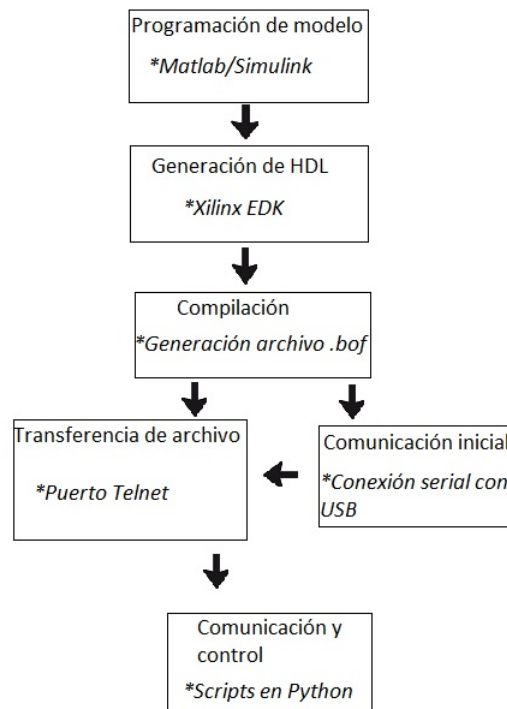


Figura 3.4: Secuencia para programación y uso de la tarjeta ROACH2.

Existen 3 tipos de bibliotecas y cada una contiene un tipo de bloques específicos, los bloques de las bibliotecas llamados bloques amarillos contienen bloques que realizan la interfaz con el hardware como son los bloques ADC, Ethernet o bloques de memoria, los bloques de color verde representan el procesamiento de señal como pueden ser filtros y bloques de FFT, por último los bloques azules de Xilinx, etc. contienen funciones de bajo nivel como retraso, adición, multiplexación, En la figura 3.5 se observa el bloque Xilinx System Generator en conjunto con el bloque XPS config que son un requerimiento para todos los diseños, pues son quienes se encargan de configurar la plataforma con las configuraciones del hardware seleccionado, también es indispensable crear un generador de sincronía entre todos los bloques, inclusive

para poder realizar la sincronía entre varias tarjetas de la misma serie.

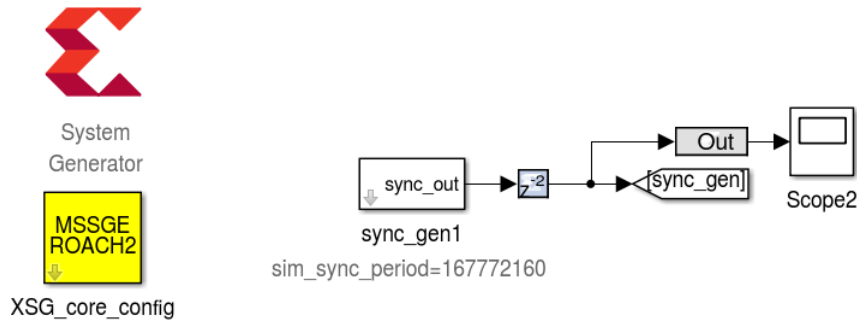


Figura 3.5: Conjunto de bloques necesarios en todos los diseños, pues se encargan de cargar todas las configuraciones de la tarjeta ROACH2.

3.3. Construcción de un interferómetro en Simulink con bloques CASPER

Se presentan los bloques utilizados y las interconexiones de los mismos para la creación de un interferómetro, Es necesario conocer el comportamiento del módulo ADC para saber los intervalos de voltaje y frecuencia en las que se puede trabajar, por lo que se analiza su modo de operación. Para poder realizar interferometría con detector de ley cuadrada es necesario llevar las dos señales en fase, y se realiza un retardo digital de la señal.

3.3.1. Retraso de la señal

El ancho de banda de un ADC está definido básicamente por la frecuencia de muestreo, que debe ser por lo menos dos veces la frecuencia máxima a procesar [40], por lo que basta una frecuencia de muestreo de $2B$ muestras/segundo donde B es el ancho de banda, se garantiza una reconstrucción perfecta para el límite de banda, sabemos que el ADC2x14-400 trabaja con una señal de reloj $F_s = 400MHz$ por lo que nuestro ancho de banda (BW) es:

$$BW = \frac{F_s}{2} = \frac{400MHz}{2} = 200MHz, \quad (3.1)$$

entonces podemos decir que el ancho de banda de nuestro interés se encuentra comprendido dentro este intervalo.

Al convertir una señal analógica en un código binario existirá un número finito de pasos, el número de bits que se utilizan para representar dicho número es la resolución y representar un valor de voltaje, nuestro ADC tiene una resolución de 14 bits, por lo que puede codificar entrada analógicas de 0 a 16384 diferentes niveles, sabiendo que la entrada que admite es de 2.2Vpp, al centrarnos en cero el intervalo de voltaje que admite el ADC es de $-1.1V$ a $1.1V$, la

3.3 Construcción de un interferómetro en Simulink con bloques CASPER 46

resolución de voltaje llamado Q será igual al límite de voltaje superior menos el límite inferior dividido entre el número de niveles, por lo que tendremos una resolución de:

$$Q = \frac{(1.1 - (-1.1))V}{16384} = 0.000134V = 134\mu V. \quad (3.2)$$

Para poder tener ambas señales completamente en fase se implemente un retardo digital mediante un bloque que utiliza BRAM para el almacenamiento y tiene un retraso programable en tiempo de ejecución, por lo que el retardo está dado en ciclos de reloj, sabiendo que la frecuencia de ejecución es de 100MHz, por cada unidad de retraso la secuencia que entra al bloque será retrasada $10ns$ (nano segundos), esto nos ayuda a alinear una señal de datos específica con otra señal que está retrasada por diferencia de longitud de recorrido desde la antena hasta el convertidor o por un ángulo de medición $Am \neq 0$ medido a partir del cenit².

Se sabe que la velocidad de una onda por una línea de transmisión es finita, puesto que la máxima velocidad que una onda puede tener es en el vacío y que es conocida como $C = 300 \times 10^6 m/s$, por lo tanto la energía que se propaga en una línea de transmisión lo hará a una velocidad menor a C , siendo un factor de velocidad:

$$V_f = \frac{V_p}{C}, \quad (3.3)$$

donde V_f es el Factor de velocidad, V_p la velocidad de propagación en la línea; el factor de velocidad para una línea de transmisión depende casi por completo del dieléctrico que contiene la línea, donde su valor se determina por:

$$V_f = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}}, \quad (3.4)$$

con ϵ_r como la permitividad relativa del dieléctrico, comúnmente los fabricantes incluyen la velocidad de propagación de los cables para RF, en este caso, se utiliza para pruebas un cable con $V_f = 0.76$ [41], por lo que obtendremos una velocidad de propagación dada como [42]:

$$V_p = 300 \times 10^6 m/s \times 0.76 = 228 \times 10^6 m/s, \quad (3.5)$$

sabiendo el tiempo de retraso mínimo que nos genera el bloque, y la velocidad de propagación, podemos saber la longitud que recorre la señal por unidad de retraso (1ns), mediante la ecuación:

$$l_r = V_p n_r t_r, \quad (3.6)$$

para los cuales l_r representa la longitud de retardo por cada retardo en metros, n_r el número de retardos aplicados al bloque y t_r es la base de tiempo de retardo en segundos.

Ahora es posible hacer interferir las señales de ambas, esto conociendo las longitudes de recorrido de las señales vistas desde cada una de las antenas hasta el convertidor ADC, donde

²Intersección de la vertical de un lugar con la esfera celeste, por encima de la cabeza del observador [5].

3.3 Construcción de un interferómetro en Simulink con bloques CASPER 47

el procesamiento comienza, en la figura 3.6 se realiza el acondicionamiento de señales y la interferometría, en general se presenta un diagrama de bloques en Simulink el cual toma las señales digitalizadas que entrega el bloque `adc_mkdir_4x`, se realiza la calibración de amplitud mediante un offset programable realizado en los bloques llamados `offset_i` y `offset_q`, dicha calibración intenta poner el punto de referencia de cada señal en cero, posteriormente se retrasa cada una de las señales según la diferencia de cable, es decir en esta parte se aplican los retardos programables que los realizan los bloques `delay_bram_prog`, por último, al tener las señales en fase se interfieren mediante superposición con el bloque `AddSub`, obteniendo una única señal de mejor resolución que cualquiera de las dos señales independientes, dicha señal estará ahora lista para pasar a un bus de expansión y poder obtener la respuesta en frecuencia mediante un banco de filtros polifásicos.

Las imágenes de la figura 3.7 muestran el resultado de diferentes ajuste de fase temporal, se debe asegurar que además de encontrarse en fase, los datos coincidan en el tiempo de adquisición de cada antena, es decir, debemos asegurar que la señal de la antena 1 coincida con el momento de recepción de la señal de la antena 2, en la figura 3.8a podemos apreciar que aunque se alinean 2 señales en fase pero no en el tiempo de captación de un evento la amplitud no es tan pronunciada al interferir ambas señales, sin en cambio, en la figura 3.8b se han alineado las señales tal que dado un evento captado los datos adquiridos por una antena y otra coinciden temporalmente, para este caso la interferencia es más pronunciada en amplitud.

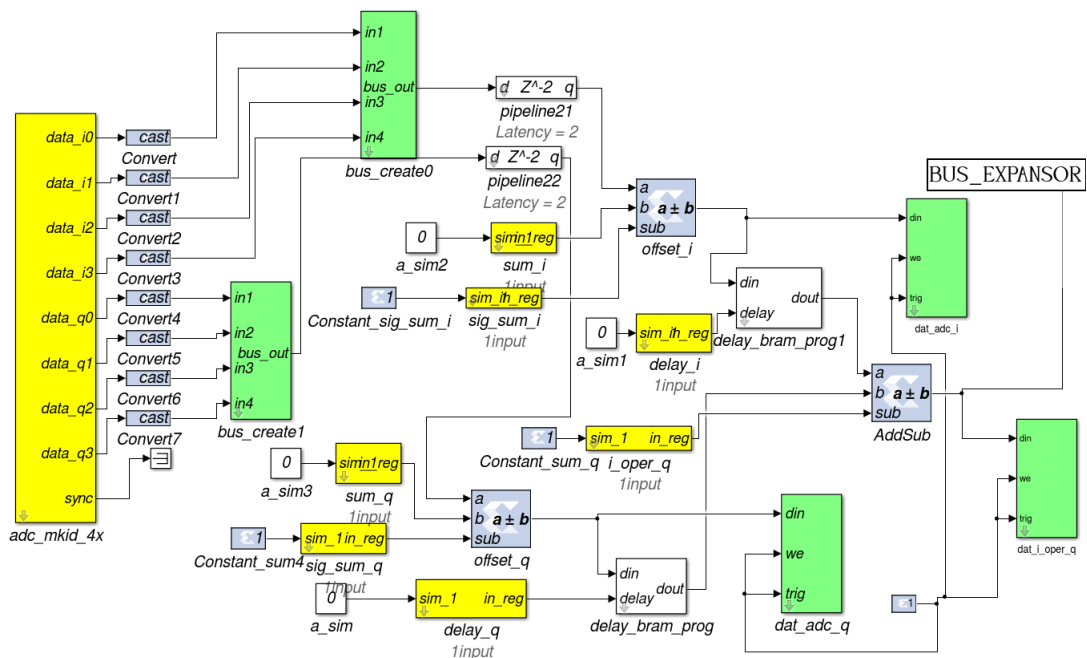


Figura 3.6: Bloques de la etapa de interferometría.

3.3 Construcción de un interferómetro en Simulink con bloques CASPER 48

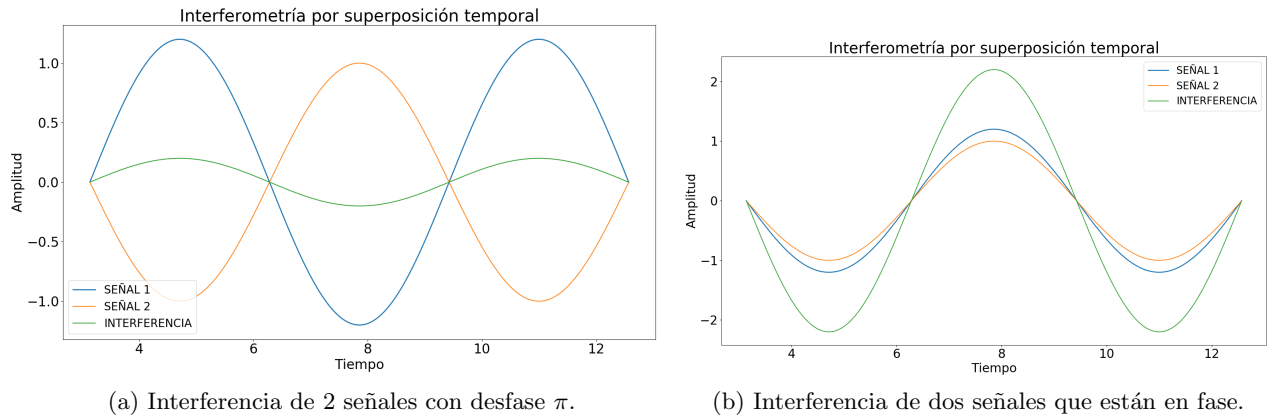


Figura 3.7: Interferencia y desfase de señales.

La importancia de tener ambas señales en fase para que la interferencia sea lo más constructiva posible, en 3.7a se observa que la interferencia resulta de menor amplitud y probablemente con menos información, para el caso de 3.7b aseguramos que ambas señales contengan la mayor información en común.

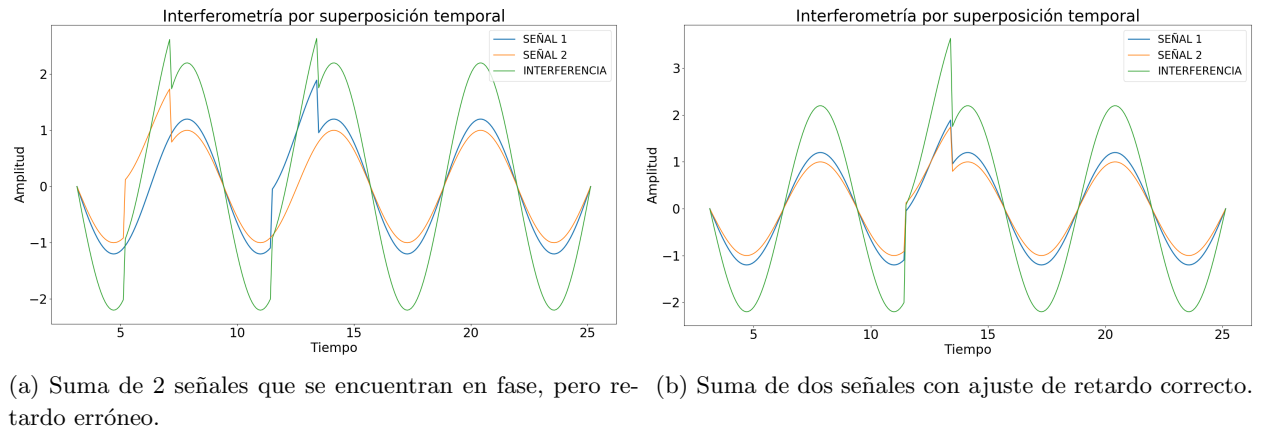


Figura 3.8: Interferometría por superposición temporal.

Se observa que aunque en 4.2a las señales se encuentran con la misma fase y se asume que en determinado tiempo se recibió un evento, debido a un mal ajuste de retardo las señales de ambas antenas no coinciden en tiempo, a diferencia de 4.2b donde el retardo es el correcto y los eventos coinciden en tiempo de ejecución, por lo que el resultado de la interferencia se verá con mejor resolución el evento.

3.4. Banco de filtros Polifásicos

La descomposición polifásica es básicamente la descomposición de una señal en múltiples fases, es de suma importancia la transformada de Fourier, la cual relaciona la autocorrelación de una función con su espectro de potencia, en la instrumentación astronómica dicha función es siempre el campo electromagnético, en particular, el caso discreto denominado Transformada Rápida de Fourier (FFT) aplicado directamente en la electrónica digital y procesamiento de señales, es una implementación optimizada de un DFT que implica menos cómputo para llevarse a cabo, sabemos también que mediante Fourier una onda en el dominio del tiempo puede ser representada por suma acumulada de senos y coseno.

En la figura 3.9 se observa la estructura de un banco de filtro polifásico en diagramas de Simulink, el bloque llamado `pfb_fir_real` es el encargado de dividir la señal en toques paralelos para aplicarles filtros de respuesta de impulso finito (FIR)³, hasta este punto la señal sigue estando en el dominio del tiempo, al combinarlo con el bloque `fft_wideband_real` toma el nombre de banco de filtro polifásico. El bloque FFT de banda ancha con muestra real calcula la transformada rápida de Fourier, dentro del modelo del bloque están los parámetros de máscara y los puertos que tiene el bloque, que en general admite como entrada muestras en paralelo de una señal en el dominio del tiempo, dado que es una FFT real descarta las partes imaginarias negativas, es por ello que sólo obtenemos dos puertos de salida complejas a 4 entradas reales, cada salida producirá canales secuenciales en cada ciclo de reloj, entonces una FFT de 1024 puntos nos devolverá 512 canales.

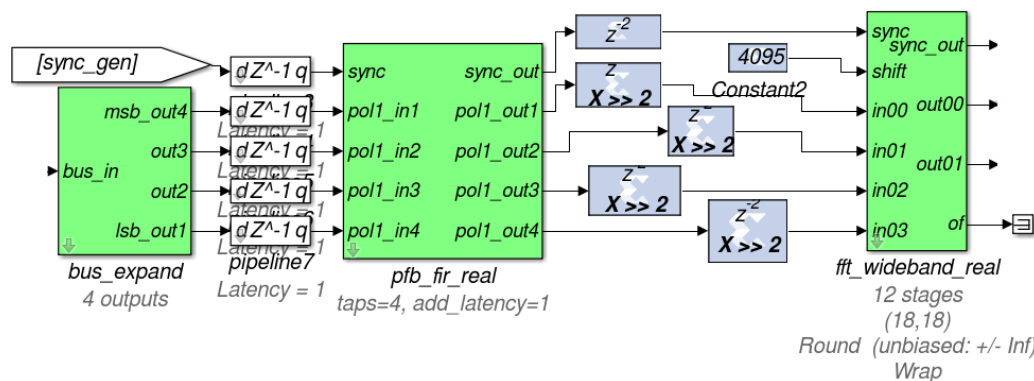


Figura 3.9: Implementación de un PFB con bloques de simulink de la librería CASPER y Xilinx.

El modo de operación del PFB ocurre en operación por ciclo de reloj donde en el primer ciclo se obtiene el canal de frecuencia cero y el canal de frecuencia uno, para el segundo ciclo

³Un sistema FIR tiene una respuesta al impulso que es cero fuera de un determinado intervalo finito, los cuales sin pérdida de generalidad tiene la forma [37]:

$$y(n) = \sum_{k=0}^{-1} h(k)x(n - k). \quad (3.7)$$

de reloj devolverá el canal 2 y el canal 3, es decir, por cada ciclo de reloj devolverá 2 canales de frecuencia, entonces necesitamos almacenar cada conjunto de secuencias de canales, una llamada par y otra impar, al final cada secuencia se tiene: par=0,2,4,6,8...N-1, y el impar: 1,3,5,7,...N, donde N es el ancho de canales, por lo que para obtener un espectro completo es necesario intercalar las secuencias al final del procesamiento, en la figura 3.10 se encuentra implementado un diseño de acumulador de canales, los datos son tomados desde la salida del la FFT y almacenada en registros par e impar, hasta que se cumple el largo de la trama definida por el usuario mediante `acc_len`, la extracción de información y la combinación de los datos para obtener el espectro completo se realiza posteriormente mediante código en Phyton. En la figura 3.11 se observa la construcción final del interferómetro de dos antenas en Simulink, donde se encuentran encerradas y mencionadas cada una de las etapas, algunas de ellas se encuentran descritas anteriormente, los grupos restantes son el de configuración, que contiene la información de la tarjeta ROACH2, el de sincronización quien es el encarga de generar pulsos de sincronía entre todo el diseño, la cual funciona como un reinicio de todos los bloques para comenzar de nuevo la adquisición y procesamiento, los puertos de entrada que son simplemente las variables para el offset, retardo de señal y reinicio del sistema, por último las salidas, que únicamente son mapeadas a los led de la tarjeta para visualizar eventos como reinicio, inicio y fin de tramas [43].

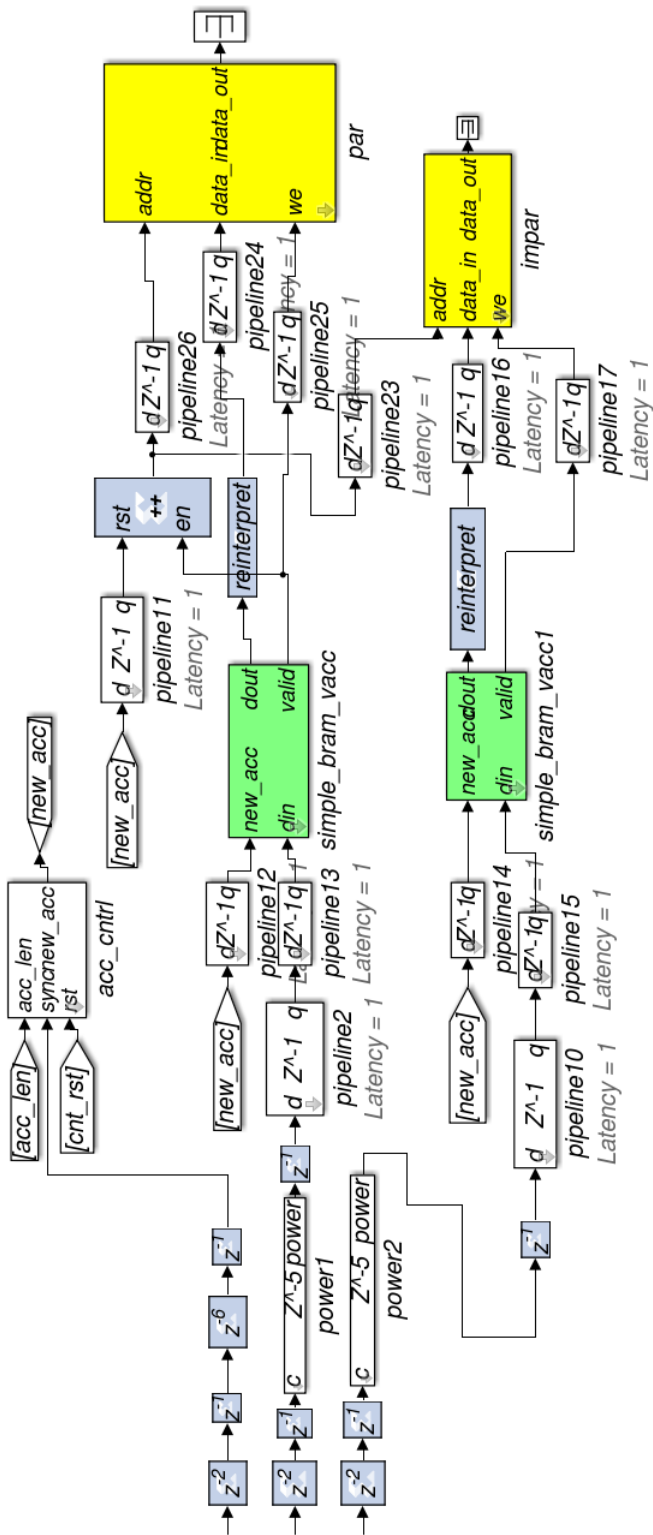


Figura 3.10: Acumulador de Canales.

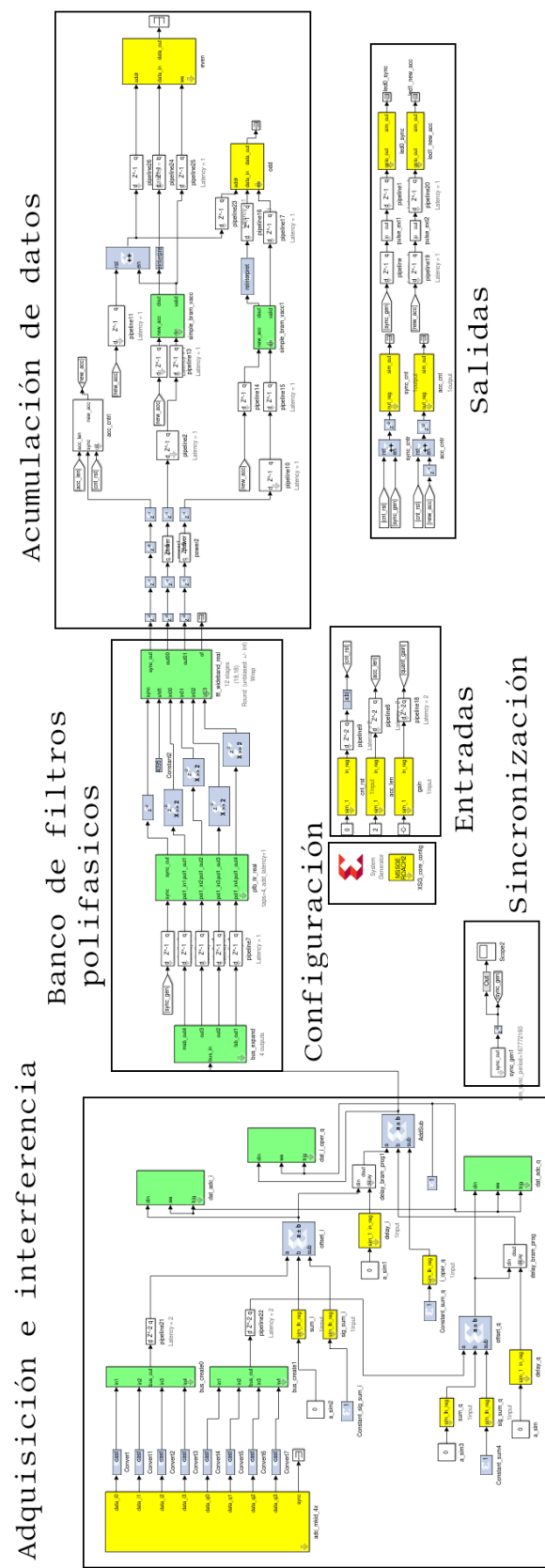


Figura 3.11: Diagrama de bloques general del interferómetro de 2 antenas.

3.5. Integración de la electrónica

En esta sección se describe el acondicionamiento electrónico que se hace a la señal proveniente de las antenas, con el objetivo de tener una mayor amplitud de la señal y poder mejorar la resolución. Otro tipo de acondicionamiento es el eléctrico, el objetivo es tener como suministro de energía eléctrica bancos de baterías de 12V, en la figura 3.12 se muestra el esquema general de la interconexión de los diferentes dispositivos y equipos.

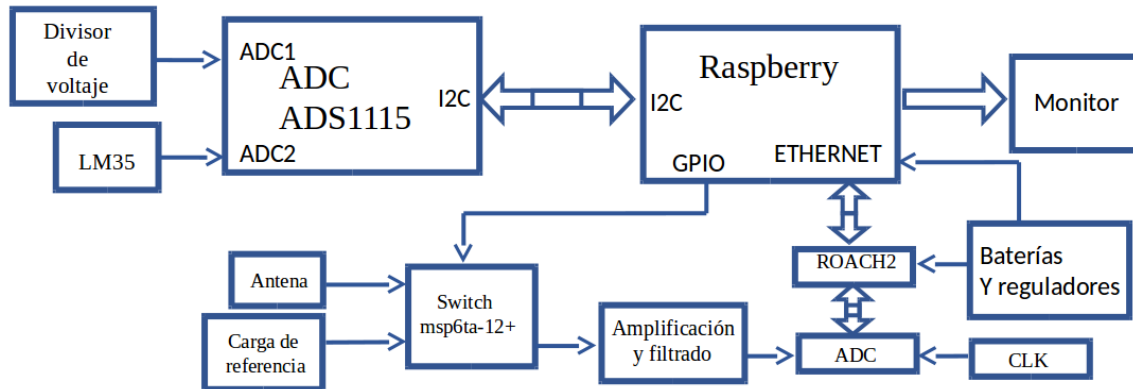


Figura 3.12: Esquema de la integración de la electrónica para el monitoreo de variables y operación.

El divisor de voltaje se encarga de realizar el monitoreo del voltaje presente en las baterías y reguladores, un sensor de temperatura LM35 que se encarga de medir los cambios de temperatura en el ambiente que pudiera hacer variar las mediciones, ambos dispositivos envían su información mediante un módulo ADC de comunicación I2C a una Raspberry, a su vez, dicha Raspberry realiza el control con sus GPIO de un switch mecánico, quien conmuta entre la señal proveniente de la antena y la señal de una carga de referencia, el recorrido de dicha señal llega a una etapa de amplificación y filtrado, la cual entra al ADC de la ROACH2 que a su vez envía su información a la Raspberry por ethernet, cabe mencionar la entrada de reloj clk que ingresa al ADC de la ROACH2, desde ahí se realiza la sincronización, la programación y control se puede visualizar con un monitor conectado a la Raspberry.

3.6. Front-end y acondicionamiento eléctrico de equipos

Es conocido como front-end la etapa analógica encargada de recibir y acondicionar la señal proveniente del espacio, que incluye detectar y amplificar la señal, en la sección de pruebas, el objetivo de incluir atenuadores a una señal amplificada ayuda a atenuar los niveles de ruido que fueron insertándose a lo largo de la línea de transmisión, las características de dichos dispositivos fueron presentados en el capítulo 2, por lo que ahora sólo se presenta la estructura de conexión y la implementación en la figura 3.13.



Figura 3.13: Implementación de la etapa front-end que inicia la salida de la antena y termina en la entrada del ADC de la ROACH2.

Para poder realizar mediciones fuera de un laboratorio existen algunos inconvenientes con la implementación del sistema, el principal problema es la alimentación de energía eléctrica, por lo que se acondiciona con bancos de baterías de 12V, esto a su vez ayuda a reducir el ruido eléctrico en el sistema y lo hace portable, mediante reguladores de voltaje se obtienen los valores de 5V, 3.3V y 12V, voltajes requeridos por la tarjeta ROACH2 y la Raspberry para la interfaz, quien hará la función de la computadora en la etapa de operación, en la figura 3.14 se observa la tarjeta Raspberry con las conexiones de los periféricos utilizados, los puertos GPIO son utilizados para la comunicación del ADC que monitorea la estabilidad de voltaje y temperatura, el conector rj45 sirve para la comunicación ROACH2-PC.

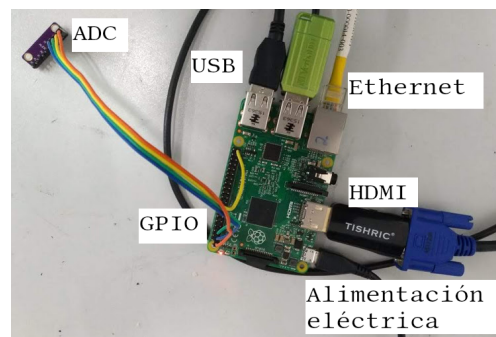


Figura 3.14: Periféricos de Raspberry utilizados.

Una de las variables que pueden afectar la calidad de recepción o incorporar ruido a la señal es la temperatura del ambiente y las caídas de voltaje en el suministro de energía, para ello se implementa un monitor de temperatura y voltaje con tiempo de actualización ajustable, las lecturas serán tomadas por los pines digitales de la Raspberry como se vio en la figura 3.14,

quienes obtendrán la información de un módulo ADC de 4 canales mediante comunicación I2C, que se muestra en la figura 3.15.

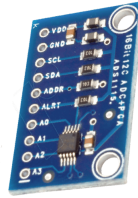


Figura 3.15: ADC de 4 canales de 16 bits cada uno, comunicación I2C con bajo consumo de corriente y amplio intervalo de operación [44].

la temperatura será monitoreada con un muy conocido sensor lm35, el cual asegura una precisión de 0.5°C , fácil acoplamiento y un alto intervalo de operación que va desde los -55°C hasta los 150°C [45].

Por último, las variaciones del voltaje de la fuente de alimentación estarán monitoreadas por un arreglo de resistencia como el de la figura 3.16 que pretende dividir la tensión por un factor de 5, teniendo como valores $R1 = 30k\Omega$ y $R2 = 7.5k\Omega$, para poder medir valores de hasta 25V que equivale a la mayor resolución admitida por el ADC a 5V , dada la ecuación del divisor:

$$v_{out} = v_{in} \frac{R2}{R1 + R2}, \quad (3.8)$$

entonces nuestro intervalo de operación del divisor en la entrada será de $0\text{V} - 12.5\text{V}$ que es lo que puede proporcionar la batería, equivalente al intervalo $0\text{V} - 2.5\text{V}$ que es la mitad del intervalo de voltaje que admite la entrada del ADC.

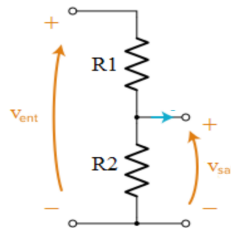
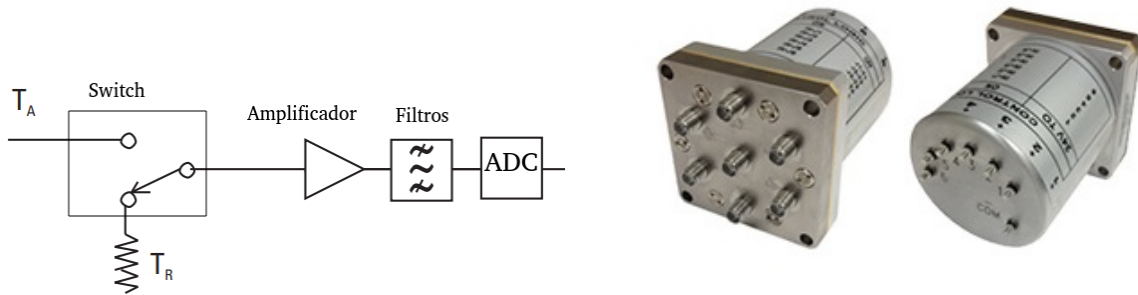


Figura 3.16: Arreglo de divisor de voltaje para medición de las variaciones de potencial en la batería.

Varios radiómetros utilizan la medición de una fuente conocida como referencia de calibración, es decir, conociendo el comportamiento de una fuente conocida (puede ser una carga a la entrada del sistema en vez de la antena) es posible saber si el sistema tiene cambios en las mediciones en un intervalo de tiempo. También, al medir la diferencia de temperaturas, entre la temperatura de la antena y la temperatura de una referencia conocida se puede reducir la temperatura de ruido (Radiómetro Dicher) [46].



(a) Diagrama del witecho de monitoreo de Temperatura de antena y monitoreo de la Temperatura de referencia para cada unas de las antena.

(b) Switch MSP6TA-12+ que se acopla para realizar la conmutación de medición.

Figura 3.17: Se presenta el diagrama donde se implementa el switch mecánico y una imagen del dispositivo.

El diagrama general de la conmutación de muestreo entre la antena y la carga se observa en la figura 3.17a, dicha conmutación es con un tiempo programable por el usuario, que se implementa en Python, en la figura 3.17b se muestra el dispositivo switch seleccionado. Una vez que se cuenta con la integración de la electrónica y al firmware que se carga a la ROACH2, es necesario la creación de una interfaz que ayude a la operación y control del interferómetro.

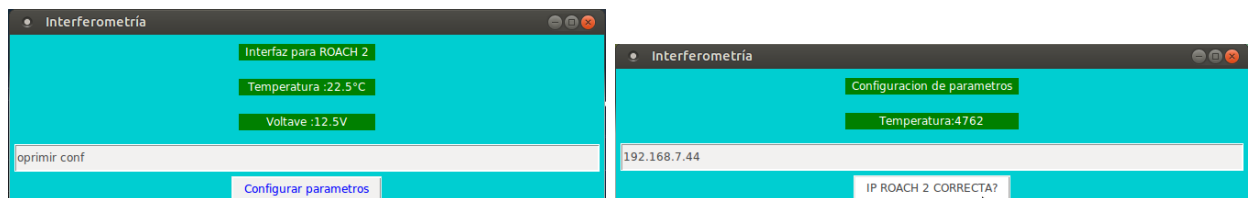
Capítulo 4

Interfaz de visualización y de análisis fuera de línea

En este capítulo se presenta una interfaz desarrollada en Python, con el objetivo de realizar el control de la ROACH2 de manera gráfica, dejando de lado el procedimiento mediante líneas de comando, sustituyendo la PC convencional por una tarjeta Raspberry ambientada con Ubuntu (la ambientación de la Raspberry es muy similar a la ambientación que se requiere en una computadora), también se muestra la interfaz que se utiliza en el análisis de los datos de observación recopilados.

4.1. Estructura de las interfaces en Python

Una vez que se tiene el diseño en Simulink el cual se ha compilado y generado el archivo con extensión .bof, fue necesario crear un método de visualización de los datos, esto se realiza mediante programación en Python, lenguaje que cuenta con librerías generadas por el equipo CASPER que facilitan su programación, control y visualización de datos exportados desde la ROACH2, se necesita pre-configurar la tarjeta ROACH2 para tener acceso a su programación y control, una vez que se tiene configurada y se conoce la dirección IP, se utiliza dicha interfaz que hace amigable su control.

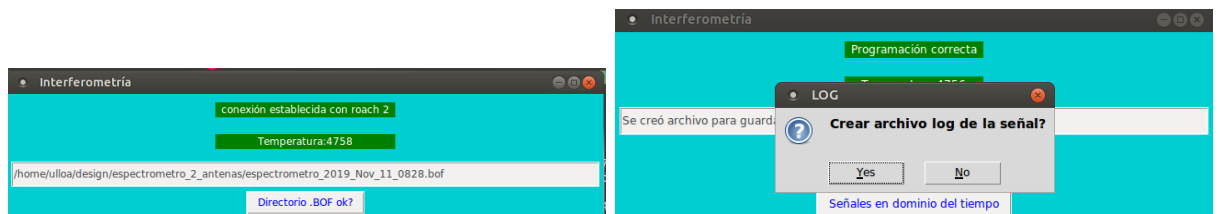


(a) Pantalla para iniciar la comunicación con ROACH2. (b) Se solicita ingresar la dirección IP de la tarjeta.

Figura 4.1: Pantalla principal de la interfaz para comunicación y control de ROACH2.

En las 2 imágenes de la figura 4.1 se asume que la tarjeta ROACH2 y la tarjeta Raspberry se encuentran conectadas en el mismo segmento de red, ya sea por un router o un cable de red cruzado.

Una vez que el software autentifica la conexión con la tarjeta, el siguiente paso es ingresar la ruta donde se encuentra nuestro archivo con extensión .bof, tal como se observa en las imágenes de la figura 4.2, si la dirección es correcta se tendrá la opción de crear un archivo de extensión .log que guarda todos los datos de monitoreo y los datos de la señal para un análisis offline. Si en cualquiera de los pasos anteriores se genera un error o desconexión de la tarjeta ROACH2 el sistema no dejará pasar a los posteriores pasos, y mandará ventanas emergentes avisando un error, en la figura 4.3 se aprecia un error, mediante la terminal nos complementa la información sobre cual podría ser el error, también no informa cuando los demás componentes se encuentran operando con normalidad, lo que ayuda a estar verificando que una toma de muestra no contenga errores de lectura o comunicación.



(a) Se solicita la ruta del archivo a cargar.

(b) Podemos seleccionar el almacenamiento o no de los datos.

Figura 4.2: Carga de firmware a la ROACH2 y generación de log de la señal.

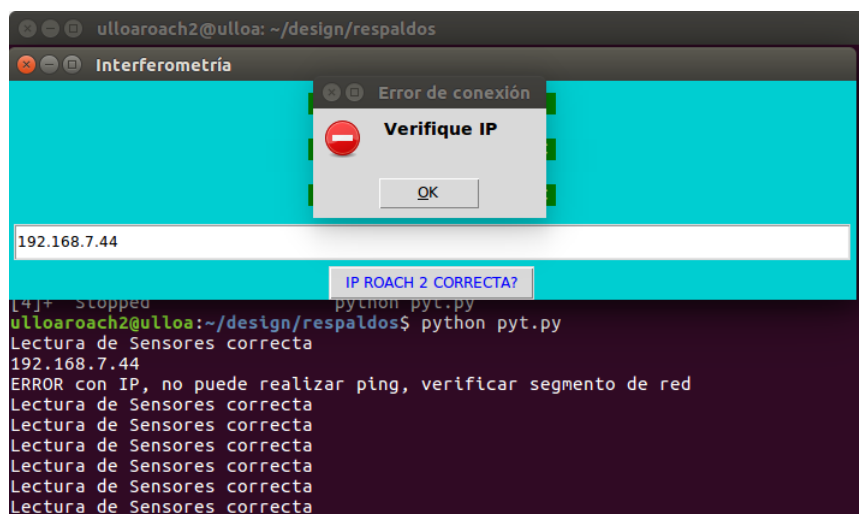


Figura 4.3: Lanzamiento de ventanas emergentes al detectar algún error, la consola proporciona más información sobre los procesos.

Si podemos observar la ventana de la figura 4.4 la programación de la ROACH2 se ha realizado con éxito y se podrá realizar las pruebas de integración, a partir de aquí será posible observar la forma de la señal en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia, además, en esta parte es posible ajustar retardos temporales y offset de voltaje de cada una de las señales, donde cada unidad de offset aplicado desplaza la señal en 1 milivolt dependiendo el signo aplicado, mientras que cada unidad de retardo ingresado retarda la señal 10 nanosegundos, tal como describe en el capítulo 3, de esta forma es posible la compensación temporal generada por diferencias de cableado y ángulo de recepción en la que se encuentra cada una de las antenas, es posible observar las variaciones de temperatura en el ambiente y el voltaje que entregan las fuentes de alimentación en tiempo real que todo el tiempo se está mostrando en la pantalla principal de la interfaz, de manera interna el software se encuentra creando un log para poder realizar un análisis posterior o para realizar otro tipo de procesamiento de los datos.

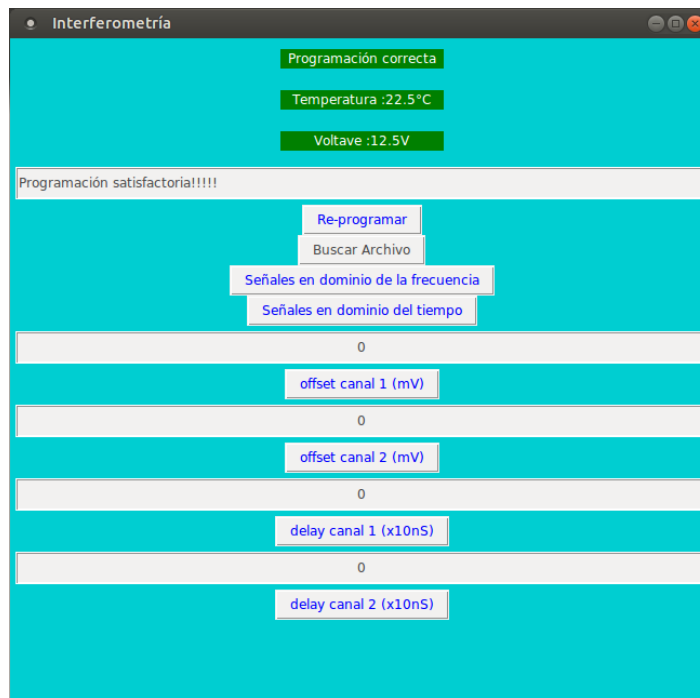


Figura 4.4: Interfaz de visualización y ajustes.

Cuando se presiona el botón con la leyenda “Señal en el dominio del tiempo” se lanza una nueva ventana que se encuentra graficando la señal obtenida por alguno o ambos canales del ADC, esto ayuda a la visualización del ajuste de voltaje y de tiempo de las señales, tal como muestra la figura 4.5, mientras que para observar el espectro de éstas mismas lecturas, será necesario presionar el botón con la leyenda “Señal en el dominio de la frecuencia”, automáticamente cambiará de tipo de gráfica temporal a una que describe el espectro de 0 a 200 MHz, observado en la figura 4.6.

Cabe señalar que las dos formas de gráficas que muestra esta primer interfaz no especifica las unidades de amplitud para la señal en el tiempo, ni las unidades de potencia para el espectro, pues estos valores son asignados en las pruebas dada una señal de referencia para el ajuste.

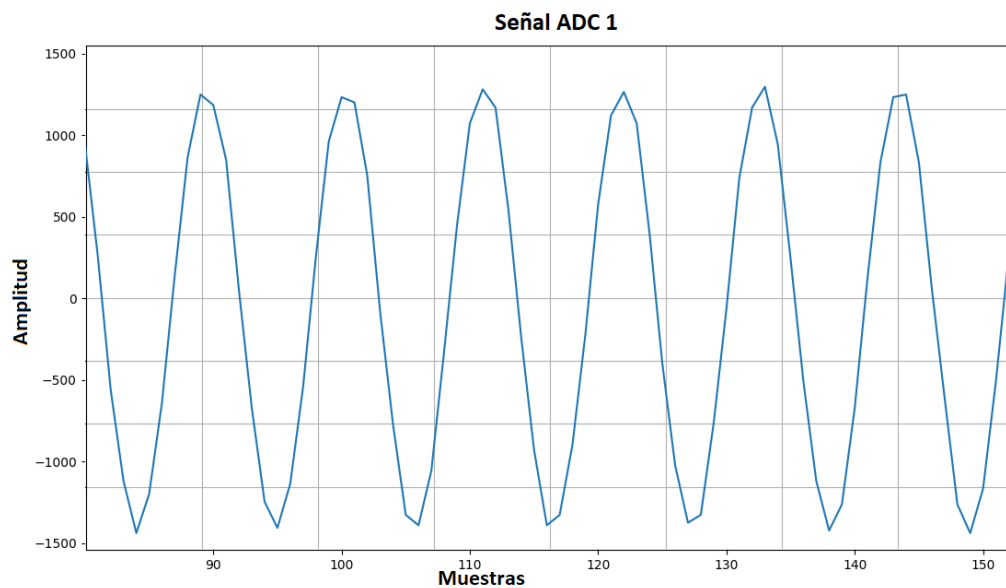


Figura 4.5: Ventana que se abre al presionar el botón “Señal en el dominio del tiempo”.

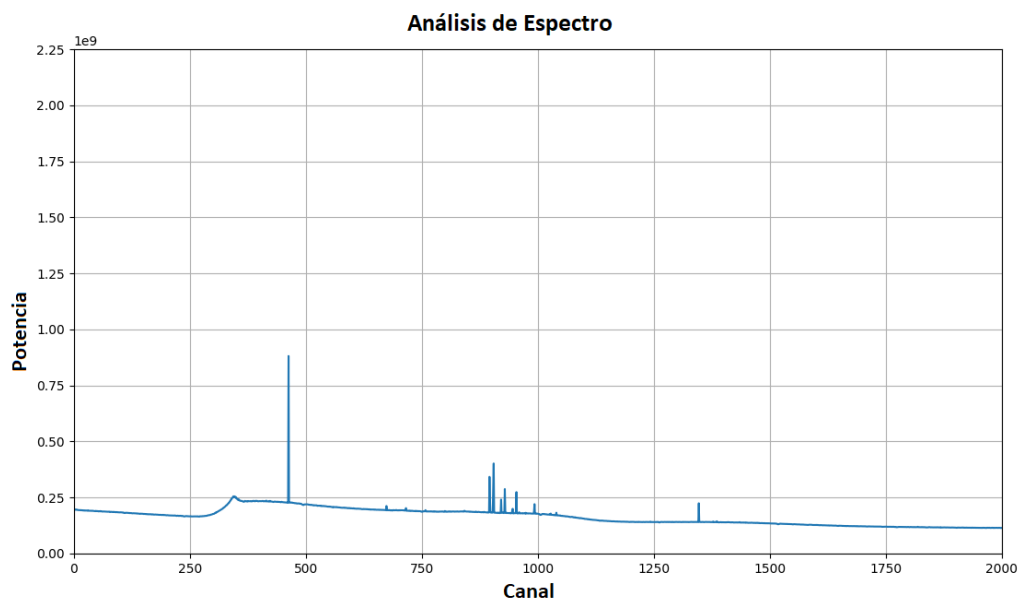


Figura 4.6: Ventana que se abre al presionar el botón “Señal en el dominio de la frecuencia”.

Hasta este punto es posible operar el interferómetro en su totalidad, las pruebas de ajustes de las señales son presentadas en un posterior capítulo, por ahora sólo se presentan las interfaces y su forma de operar. La figura 4.7 muestra archivos de texto plano de extensión .log, los cuales contienen la información almacenada correspondiente a las variaciones de voltaje y temperatura, y se generan en la misma ruta en la que se encuentra el archivo fuente de Python, para este caso llamado “pyt.py”, se puede observar que se generan archivos con el formato de nombre “Espectro.Fecha.hora.log” y “Variables.Fecha.hora.log”, y el tamaño de almacenamiento está sujeto al tiempo de toma de muestras, que pueden ir desde unos cuantos byte el equivalente a una sola muestra, hasta los Giga Byte, que correspondería a una toma de muestras de varias horas, dichos archivos son cargados en la posterior interfaz.

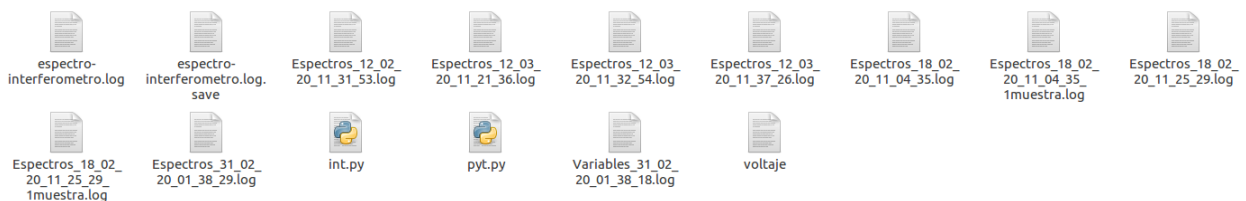


Figura 4.7: Archivos log generados.

Al visualizar un archivo log correspondiente a las variables de voltaje y temperatura, podemos ver la estructura en la que se guardan los datos, dados por una cadena que indica fecha y hora de toma de muestra, además del voltaje y temperatura leídos, el tiempo entre una muestra y otra es fácilmente configurable a nivel código fuente, debido a que los tiempos de observación son muy cortos en las etapas de prueba, se opta por tomar los datos cada 2 minutos aproximadamente, información y estructura que podemos observar en la figura 4.8. Para el caso de la información correspondiente a los espectros guardados que sirven para el análisis posterior, se muestra la estructura que conforma un archivo log en la figura 4.9, donde en la primera línea se describe el tipo de archivo “Historial de Espectros”, en la segunda línea se aprecia la fecha y hora en la que se inició el guardado de datos, posteriormente se tienen arreglos de 2040 valores, donde cada uno representa unidades de potencia no normalizada, y cada potencia representa un canal de 0.1MHz, ya que el ancho de banda en el espectro a analizar es de los 40 a 120MHz los pasos de 0.1MHz no afectan la resolución de los resultados obtenidos, pues los cambios esperados en un caso real son suaves.

se pueden buscar gráficamente a través de los botones llamados “buscar archivo”, que nos abre un explorador de archivos para navegar por los directorios y seleccionar los archivos de interés, además de sólo mostrarnos los archivos de extensión .log, la figura 4.11 muestra dicho formato, una vez cargados los archivos que contiene la información recopilada del espectro y el otro archivo que contiene la información de temperatura y variaciones de voltaje, se procede a realizar el análisis de datos mediante el botón “procesar datos”, con dicho botón se realiza el análisis estadístico de todas las muestras de espectro que se tienen almacenadas en el archivo, y por otro lado se carga el historial de las variaciones de temperatura en el ambiente y variaciones de voltaje en la fuente de energía mientras duró la toma de muestras, los resultados de esta última interfaz se discuten en el siguiente capítulo, pues es necesario tomar consideraciones al momento de tomar las muestras que se pretenden procesar.



Figura 4.10: Interfaz para el procesamiento fuera de linea.

Si durante el procesamiento de datos el sistema detecta que la estructura del archivo no es la correcta inmediatamente enviará mensaje de error, de igual manera si existen tramas incompletas en cualquier punto del análisis, el software desechará dicha muestra hasta encontrar una correcta.

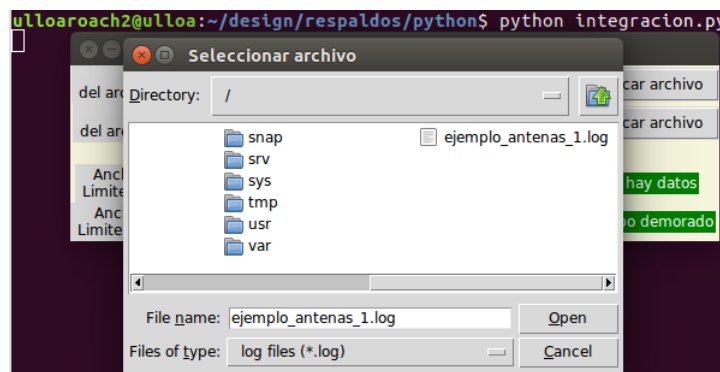


Figura 4.11: Interfaz para el procesamiento fuera de linea.

Igual que la anterior interfaz es posible conocer el estado en el que está el procesamiento de los datos, esto es mediante la consola como muestra la figura 4.12, pues además de ir mostrando los valores de los valores procesados, al final nos presenta un resumen de las muestras, como

es el número de las mismas, el tiempo estimado de observación que contiene el archivo, y el tiempo que demoró en procesarlos.

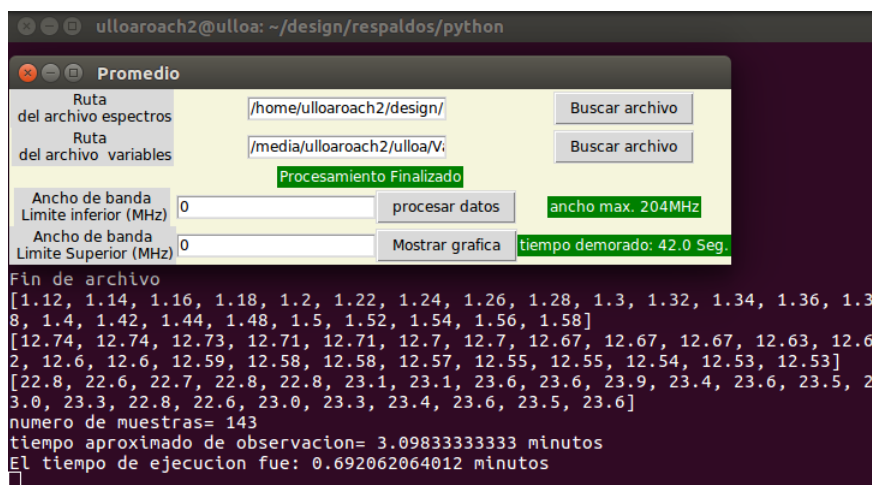


Figura 4.12: Interfaz para el procesamiento fuera de linea.

La normalización de las gráficas se hicieron de manera manual, y con ayuda de un analizador de espectros como referencia, dada una señal para ambos sistemas, se ajusta hasta obtener las mismas formas y valores de gráficas, mediante la conversión a dBm a través de una función que implementa Python en una de sus librerías. Con esto último se ha finalizado el trabajo de la integración del instrumento denominado interferómetro de dos antenas, en el siguiente capítulo final se pone a prueba el sistema.

Capítulo 5

Pruebas del interferómetro de dos antenas

El objetivo de las pruebas en la integración de sistemas es profundizar en su operación, verificando el funcionamiento correcto de las interfaces entre los distintos subsistemas que lo conforman, a pesar que cada etapa fue probada individualmente, es necesario las pruebas de forma global, en esta etapa es posible encontrar errores que en el ambiente productivo podría averiar el sistema o la fiabilidad de las muestras. En este último capítulo se presenta el ajuste del sistema, toma de muestras y el análisis de los resultados.

5.1. Ajustes del sistema

Le llamamos ajustes del sistema al acondicionamiento digital de las señales que serán procesadas, además de la normalización de los datos, para dichos ajustes y pruebas en el sistema se creó un ambiente como se muestra en la figura 5.1, donde el analizador de espectros (Anritsu S2830A) es utilizado para comparar los detalles de un espectro obtenidos por la ROACH2 y el espectro que obtiene el analizador para así normalizar los resultados, el generador de señales 1 (Anritsu MS2830A) es utilizado para inducir una señal conocida al sistema, mientras que el generador de señales 2 (Anritsu MG3710A) es utilizado como generador de señal de reloj hacia el ADC, la ROACH2 es la tarjeta principal de adquisición y procesamiento, mientras que la Raspberry es quien hace el trabajo de la PC, con la ventaja de menor consumo de potencia y mayor portabilidad, por último la etapa de front-end formada por los amplificadores, filtros analógicos, y atenuadores, en este ambiente se realizan ajustes del interferómetro, con la observación de una señal a una frecuencia específica y voltaje específico.

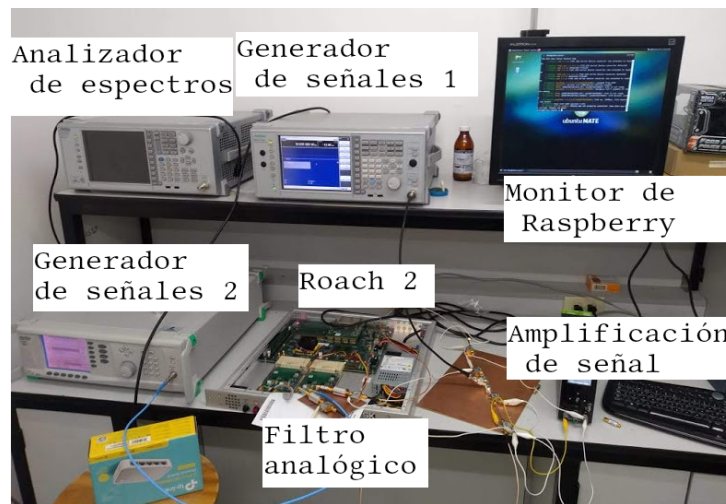


Figura 5.1: Ambiente de pruebas para las primeras implementaciones de diseño e integración.

El anterior ambiente de pruebas es realizado dentro de una jaula de Faraday¹ para tratar de eliminar las señales provenientes de estaciones de radio que se encuentran dentro de nuestro ancho de banda a analizar y puedan ser causa de ruido.

Una vez programada la ROACH2 a través de la interfaz creada, se ajusta el generador 1 con una señal senoidal a una frecuencia de 10MHz , y una amplitud de 1Vpp , que será la señal para ajustar los canales, el generador 2 se calibra a una frecuencia de 400MHz , que será la señal de reloj con la que trabajará la ROACH2, en la figura 5.2 podemos observar la señal en dominio del tiempo que ingresa a los dos canales del ADC de la ROACH2, dichas señales se encuentran desfasadas por algún número de muestras, mismo desfase que se debe corregir para una correcta interferencia, por otro lado podemos observar que la etapa del front-end no genera offset entre una señal y otra en el voltaje, por lo que bastará con el ajuste de retardos temporales. Cabe señalar que el objetivo de este paso es asegurar que las señales se encuentren en fase en el instante de procesamiento, otros ajustes de retardos también pudiera aplicarse como retardo instrumental, es decir por diferencia de recorrido de línea de transmisión. Recordando que 1 unidad de retardo aplicado mediante la interfaz retrasa 10nSegundos a la señal que se le aplique, para este caso basta con 1 retardo a la señal del ADC 2, en la figura 5.3 se observa el resultado de dicho ajuste, este procedimiento debe realizarse cada que la longitud de la línea de transmisión sea cambiada o también si se utilizan marcas diferentes, pues la velocidad de propagación en la línea puede cambiar.

¹Es una caja metálica con la finalidad de proteger los campos eléctricos estáticos, es un método usado para bloquear los campos electromagnéticos [47].

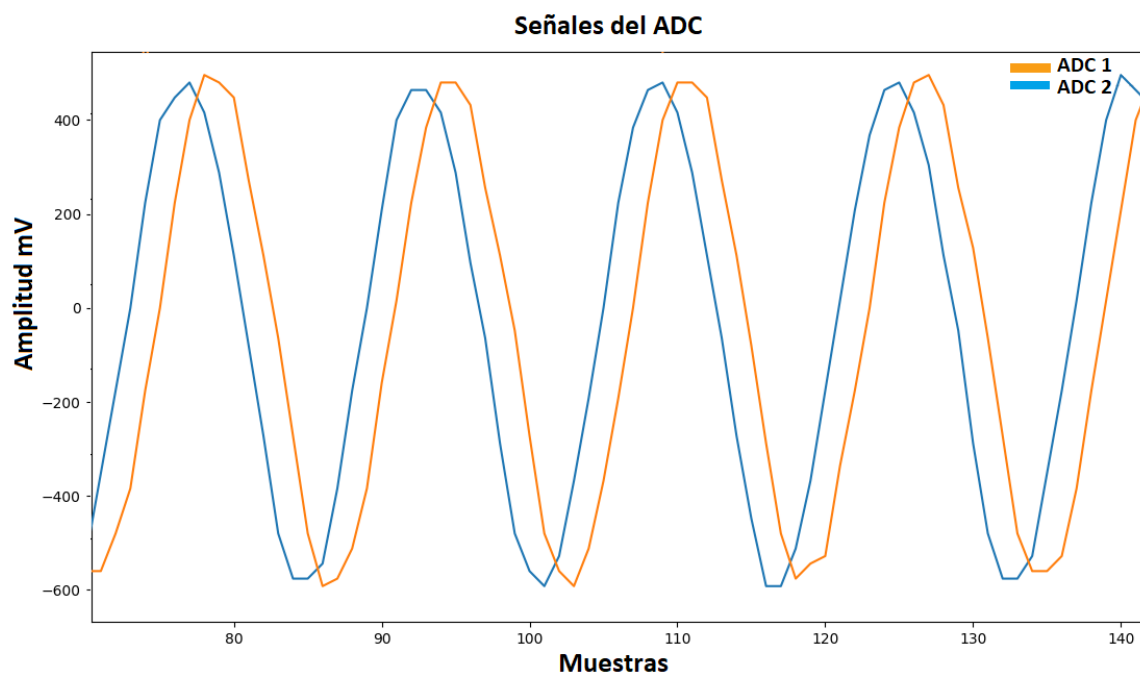


Figura 5.2: Visualización de señales que ingresan a los ADC antes del ajuste.

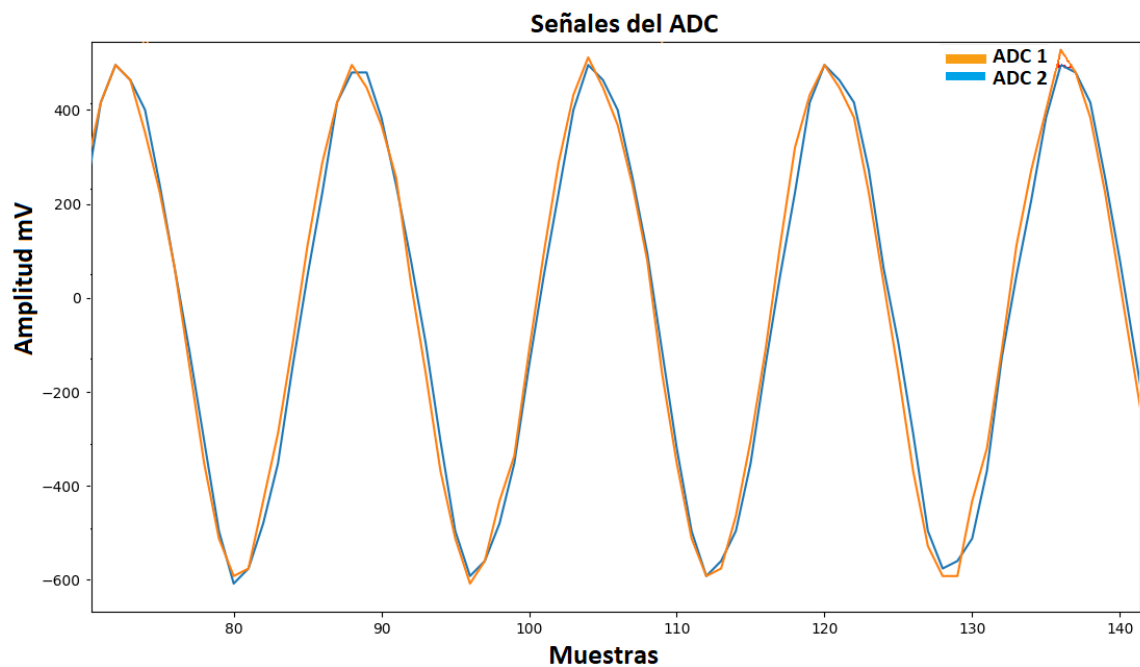


Figura 5.3: Forma y fase de las señales después de aplicarles el retardo.

Una vez ajustado el sistema y al cambiar la forma de la señal en dominio de la frecuencia, lo que se observa es el espectro de la señal resultante de la interferencia digital, que se hace entre la señal ingresada por el ADC 1 y la señal ingresada por el ADC 2, con el objetivo de visualizar una señal que se encuentre dentro de nuestro ancho de banda propuesto se ingresa por los canales una señal de apenas unos cuantos mV a una frecuencia de 50MHz , en la figura 5.4 podemos apreciar que al ser las señales de amplitud pequeña existen componentes de ruido que distorsionan la forma de nuestra señal, además dentro de las gráficas es agregada una señal que representa la resultante de la interferencia. La forma de la gráfica mostrada en la figura 5.5 corresponde al espectro de la interferencia, donde se logra apreciar un pico en la frecuencia que ingresamos, el objetivo de mostrar una gráfica de 0-200MHz es para observar la cresta de ancho de banda específico, denotado por las frecuencias de corte de los filtros, correspondiente al ancho de banda propuesto, la forma en los extremos de la cresta corresponde a la respuesta de la curva de atenuación de los filtros y la respuesta de los amplificadores, tal como se ve en el capítulo 2; en estas gráficas se manejan múltiplos de unidades de amplitud y de potencia, dichas unidades serán asignadas hasta la etapa de procesamiento fuera de línea.

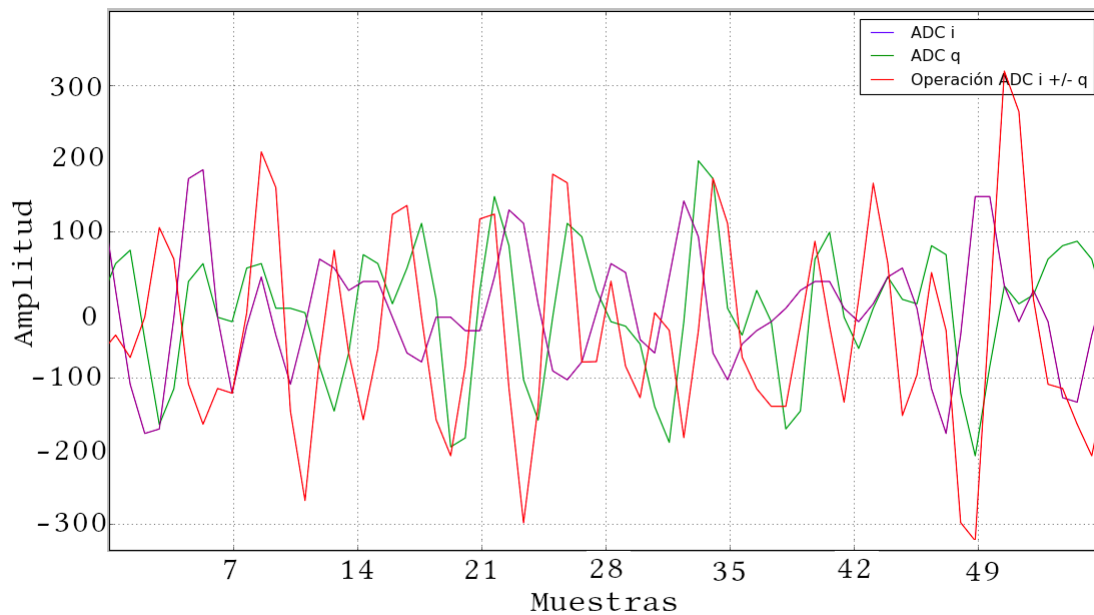


Figura 5.4: Visualización de dos señales de 50MHz en el dominio del tiempo y una señal denotada operación $i \pm q$, que representa el resultado de la interferencia de ambas señales.

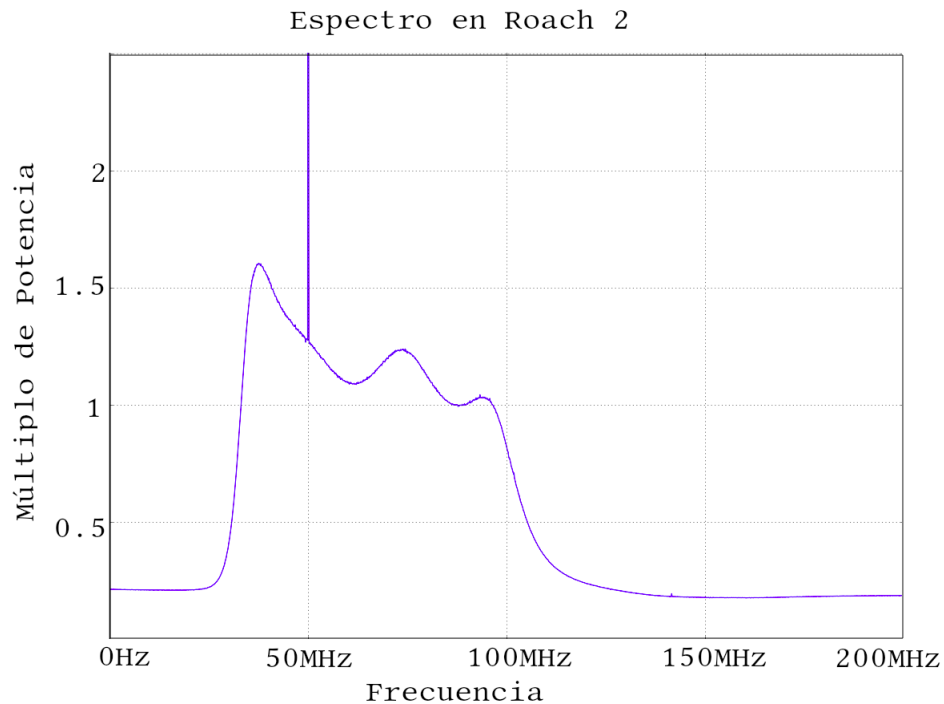


Figura 5.5: Se observa el espectro de una señal resultante de la interferencia de dos señales ingresadas por los ADC.

Posteriormente se procede a realizar la comparación del espectro que existe en el medio ambiente fuera de la jaula de Faraday que procesa la ROACH2 y el espectro obtenido por el analizador de señales, para esta prueba se pone en la entrada del analizador de espectros el conector de la etapa front–end implementado para una de las antenas, en este caso no contienen antena alguna conectada al sistema, por lo que las señales recibidas son únicamente las que son captadas por el cable que del conector que debería ir a la antena. En la figura 5.6 se aprecia el espectro que se recibe del medio ambiente, que es procesada por la ROACH2 incluyendo la interferencia, sin la excitación de ninguna señal desde el generador, esta incluye las señales de emisoras de radio a los alrededores.

Por último, en la figura 5.7 se observa el espectro que entrega el analizador de espectros del laboratorio bajo el mismo front–end que utiliza nuestro diseño, donde podemos observar los niveles de ruido son mucho mayores y no deja mostrar más detalles que si se aprecian en el diseño del interferómetro implementado en la ROACH2.

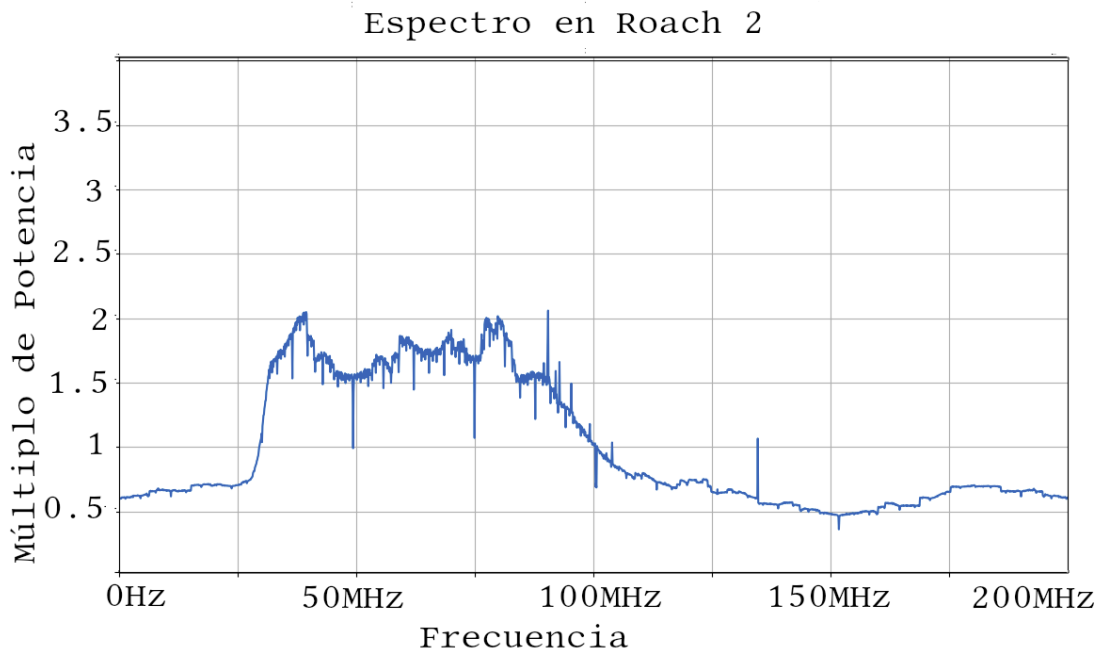


Figura 5.6: Espectro del medio ambiente fuera de la jaula de Faraday.



Figura 5.7: Espectro en el medio ambiente captado por un analizador de espectros con la señal tomada del front-end implementado.

5.2. Pruebas y análisis de resultados

En esta sección se presentan las pruebas de integración del sistema previamente ajustado, por lo cual se realiza el almacenamiento de los espectros que el interferómetro capta, para estas pruebas se integró la antena mango peel en un canal, dejando el otro canal sin antena pero con la etapa front end conectada, también, para simular las caídas de voltaje de las baterías que deberían ser acondicionadas, se conecta una batería de 12V con una carga conectada que debería mostrar caídas de voltaje con el transcurso del tiempo, el tiempo que transcurre entre una muestra almacenada de espectro y la siguiente es de aproximadamente 2.5 segundos, a diferencia del tiempo entre cada lectura y almacenamiento de variables de voltaje y temperatura que es de 2 minutos; cabe señalar que las pruebas fueron realizadas en el laboratorio de caracterización de sistemas basados en microondas, de la facultad de ciencias de la electrónica electrónica, en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla; se presentan 2 casos, una con todo el sistema dentro de la jaula de Faraday y otra fuera de la misma, se muestra una sola gráfica de variables de voltaje y temperatura, esto con el único objetivo de verificar el correcto funcionamiento de los sensores ya que no fue posible la integración de baterías en el sistema. En la figura 5.8 se muestran las gráficas que describe las variaciones de temperatura al rededor del sistema y voltaje en las baterías de prueba, para ambos casos el eje horizontal representa el horario en que transcurría la toma de muestras, se simula que la prueba inició a la 1:10 horas y terminó cerca de la 2:00 horas.

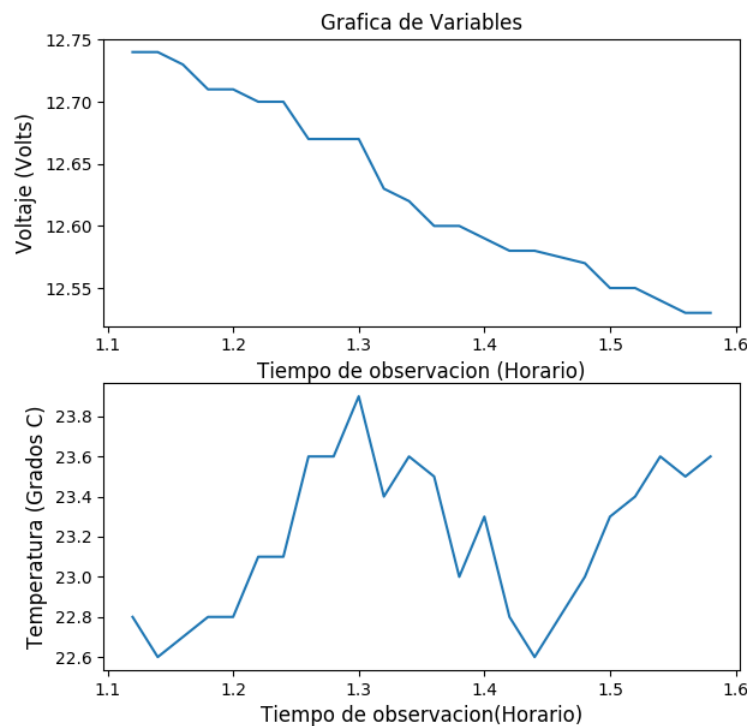


Figura 5.8: Variaciones de voltaje y temperatura mientras dura una toma de muestras.

Con respecto a los espectros, en la primer prueba dentro de la Jaula de Faraday se induce una señal a través de una antena y con ayuda de atenuadores se radian -138dBm de una onda senoidal a una frecuencia de 80MHz , con un tiempo de captura de datos de 10 minutos, en la figura 5.9 podemos observar el espectro de un instante de tiempo, la gráfica es obtenida con interfaz diseñada para el análisis fuera de línea donde sólo se toma 1 muestra, pero no se aprecia información alguna.

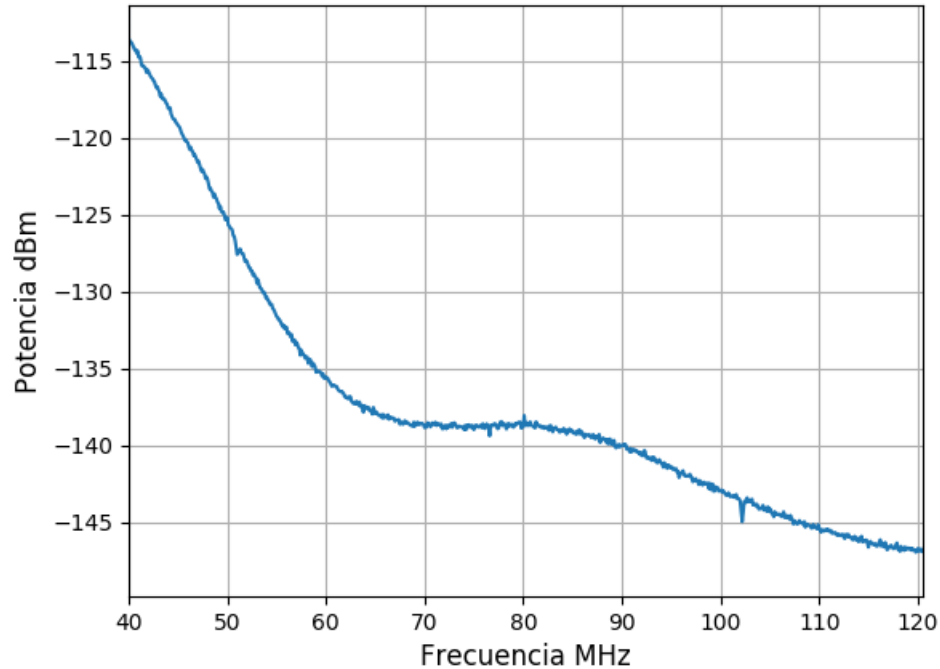


Figura 5.9: Espectro de un instante de tiempo dentro de la jaula de Faraday con una señal de 80MHz .

Al realizar un acercamiento en la zona de interés se puede observar un pico centrado en los 80MHz , que apenas logra sobre salir de entre todo el ruido, tal como se muestra en la figura 5.10, posteriormente se procesan todas las muestras almacenadas en los 10 minutos que duró la prueba, obteniendo un total de 238 espectros almacenados, dicho resultado se muestra en la figura 5.11, ahí se puede apreciar que los niveles de ruido disminuyeron y se suavizó la curva remarcando el pico de la señal inducida.

Por último se superpone la gráfica de la señal que contiene una sola muestra y la obtenida por el promedio de las 238 recopiladas en los 10 minutos, misma que se presenta en la figura 5.12, fácilmente se puede apreciar que las componentes que son de ruido o de señales pasajeras se reducen.

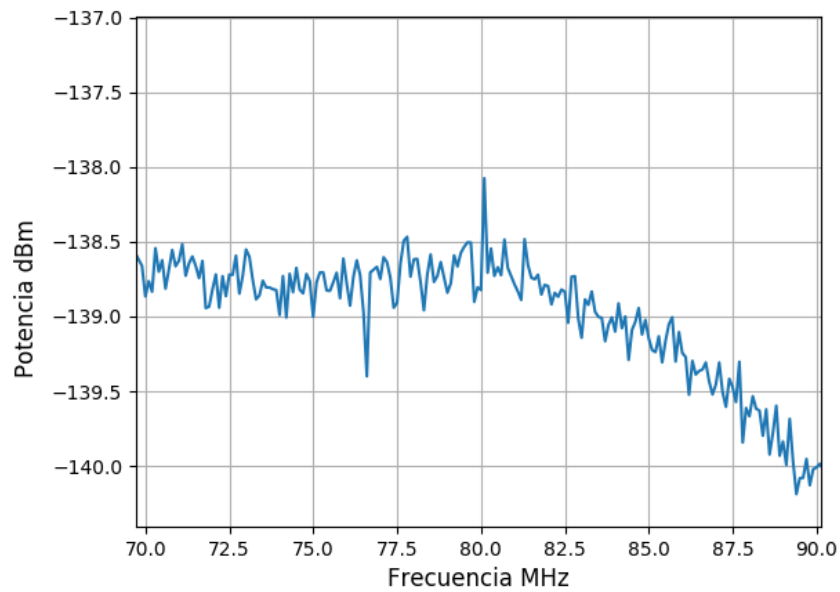


Figura 5.10: Acercamiento de la figura 5.9 al rededor de los 80MHz, donde se logra apreciar la señal que se induce.

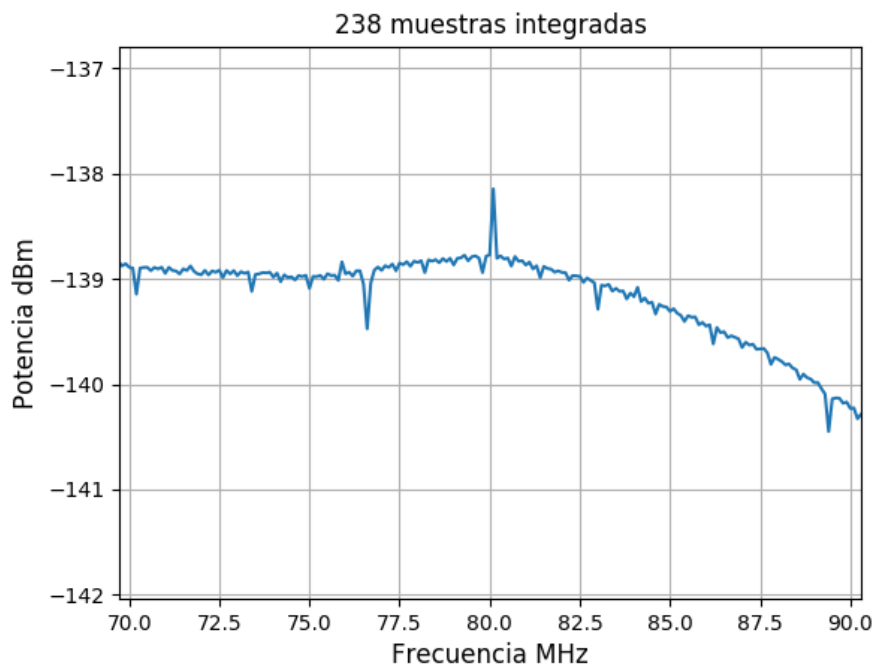


Figura 5.11: Resultado del procesamiento de las muestras almacenadas durante 10 minutos con un acercamiento en los 80MHz.

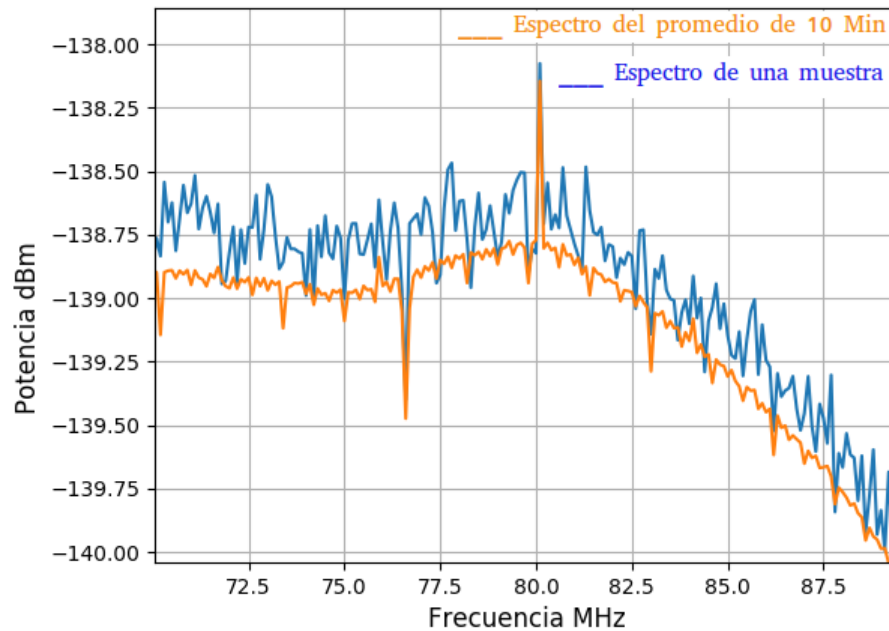


Figura 5.12: Comparación entre el espectro en un instante de tiempo y el espectro resultante del promedio de los espectros almacenados durante 10 minutos.

Por último se realizó una prueba de toma de muestras fuera de la jaula de Faraday, esto con el objetivo de captar las señales provenientes de estaciones de radio cercanas que emiten dentro de nuestro ancho de banda con una antena mango peel incluida, y procesar los datos recopilados de espectros mediante la interfaz desarrollada; a pesar que sólo es una antena conectada al sistema y debido a que dicha antena añade más sensibilidad al sistema, se decide incluir atenuadores justo en la entrada del ADC de la ROACH2 para evitar que la excesiva amplificación de las señales que se encuentran en en la zona puedan averiar el sistema; cabe destacar que aunque sólo se tiene una antena conectada el sistema sigue realizando la función de interferir las señales que capta la antena y las señales que logra captar la etapa de front-end en la que debería ir la otra antena, se muestra la información de espectros en un instante de tiempo en la figura 5.13, y la figura 5.14 muestra la información del promedio de las muestras captadas en los 10 minutos que se guardó información.

Aunque en la comparación de gráficas que presenta la figura 5.15 pareciera que la diferencia de respuesta es apenas apreciable, cabe destacar que es debido a la atenuación que fue agregada, los niveles de ruido se reducen en su mayoría, recalcando que esta ultima implementación es con el objetivo de reducir las potencias de las señales de radio emisoras, ya que en un ambiente de señales de interés con muy baja potencia serían eliminadas por el atenuador.

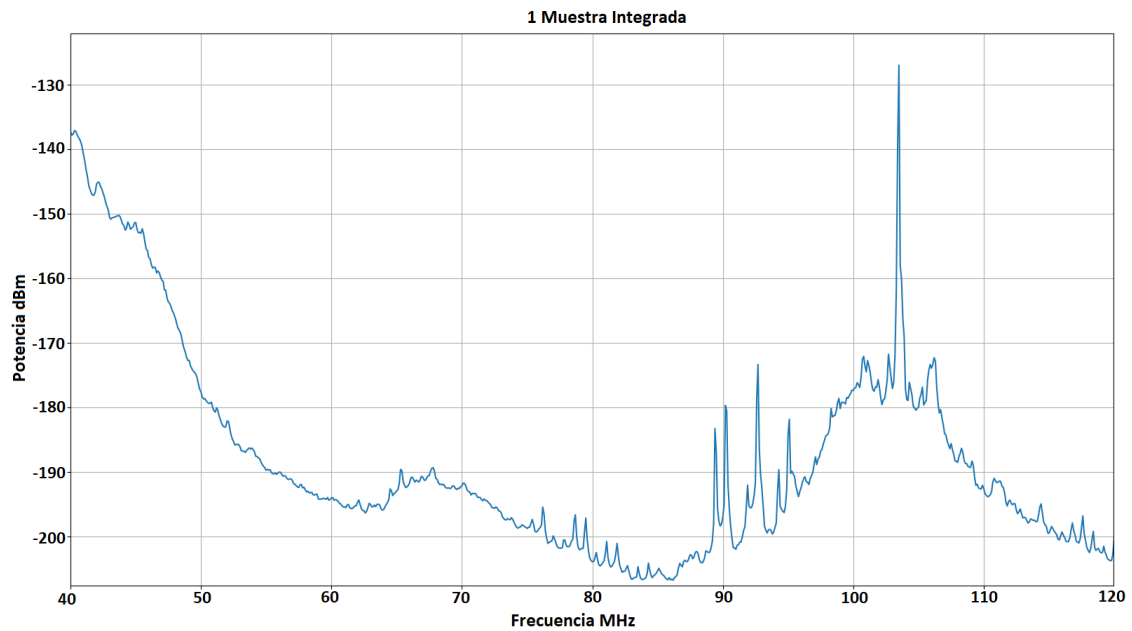


Figura 5.13: Espectro en un instante de tiempo para las pruebas fuera de la jaula de Faraday.

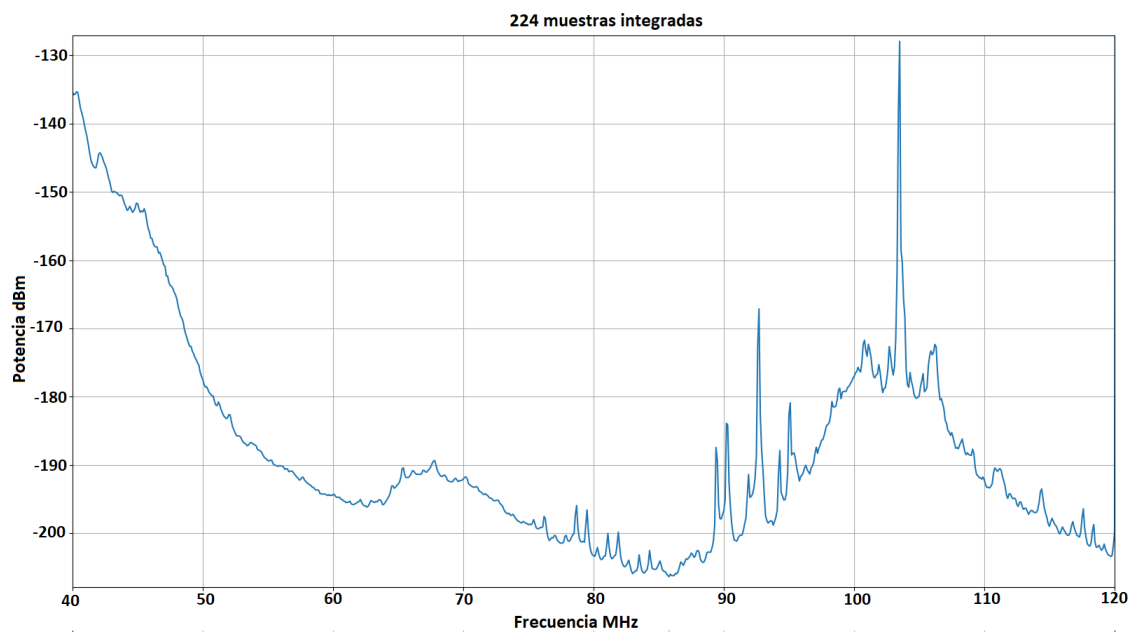


Figura 5.14: Espectro espectral resultante del promedio de los espectros almacenados durante 10 minutos.

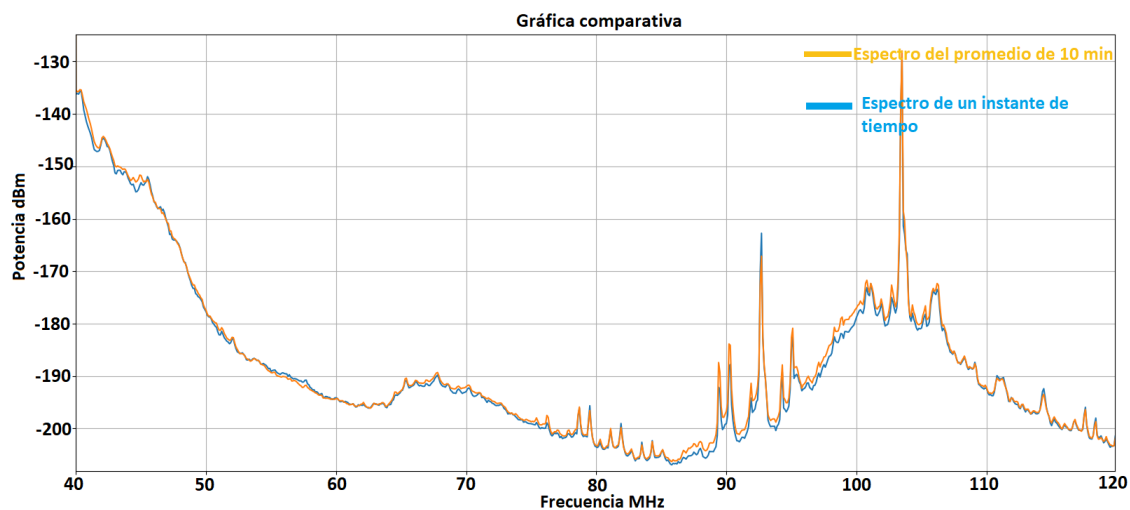


Figura 5.15: Comparación entre el espectro en un instante de tiempo y el espectro resultante del promedio de los espectros almacenados durante 10 minutos para las pruebas fuera de la jaula de Faraday.

Cabe mencionar que las pruebas que se lograron realizar quedaron sujetas a reajustes de diseño e integración de la otra antena mango peel, lo que lograría mejorar los resultados, se esperaría remarcar las señales y reducir más el ruido, además de definir la resolución angular que nuestro instrumento nos podría proporcionar.

Capítulo 6

Conclusiones

El trabajo desarrollado muestra la integración de un interferómetro de dos elementos junto con su interfaz para la visualización de la información de las señales en el dominio del tiempo y dominio de la frecuencia en tiempo real, también se mostró una segunda interfaz desarrollada para el procesamiento de espectros fuera de línea, en cuanto a las pruebas de integración, pese a que no fueron realizados en campo se logró observar una señal inducida mediante un generador de señales, y observar el espectro que se encuentra en el medio ambiente de la zona, reduciendo los componentes de ruido a través de un análisis estadístico, por lo que las etapas presentadas permitirán realizar las primeras pruebas del interferómetro para el proyecto SCH-HI con el ancho de banda de 40MHz a 120MHz.

En lo que se refiere al uso de instrumentos dedicados a la radioastronomía basados en FPGA se está estandarizando, no obstante la preparación de un equipo PC para la programación y el uso de la tarjeta ROACH2 no es trivial ya que requiere conocimiento en el uso de la consola del sistema operativo Linux, y aunque existen bloques pre fabricados en Simulink, es necesario conocer las operaciones que realiza y los parámetros que se ajustan para saber reconocer si el resultado arrojado al final de cada bloque es el correcto.

La iniciación en este tipo de tecnología ayuda a comprender a grandes rasgos la operación de los grandes telescopios en el mundo y como se está optando por realizar arreglos de interferómetros, tal es el caso del proyecto ALMA y los resultados satisfactorios que dio la interferometría con el proyecto “Event Horizon Telescope”.

Cabe resaltar que la operación de un interferómetro incluye la forma de saber diferenciar la señal esperada del ruido debido a los componentes del sistema, inserciones por fenómenos naturales e inclusive interferencias por origen humano, la estrategia de orientación de la antena o un mal retardo de la señal para su análisis puede ser también culpable de un mal resultado del procesamiento de la señal, mediante los log almacenados de espectro a través de la interfaz, es posible realizar un promedio de las muestras tomadas a lo largo de un tiempo conocido como tiempo de integración, por lo que entre más tiempo de observación se tenga, más marcadas serán las señales del continuo.

Por otro lado, la intensidad de una señal cósmica dependerá además de la potencia con que fue

transmitida, del trayecto que la misma ha tenido, uno de los aspectos más importantes incluye que la antena receptora tenga mucha sensibilidad en las frecuencias de interés y un correcto acondicionamiento de la señal, la mayor inserción de ruido se presenta por las características del sistema y por el ruido que percibe la antena.

Finalmente, algunos de los puntos para trabajos futuros incluye las pruebas con las dos antenas Mango Peel, la integración de los bancos de batería para convertir el sistema 100 % en portátil, integrar los switch para calibración del sistema y monitorear los cambios de respuesta del sistema que se dan como resultado de las variaciones de temperatura a través del tiempo de observación, así como la variación en respuesta del sistema al ir disminuyendo el voltaje del banco de baterías, para así contrarrestar dichos efectos a los resultados finales, y realizar los ajustes necesarios a partir de los cambios.

Bibliografía

- [1] Voytek, T. C., Natarajan, A., García, J. M. J., Peterson, J. B., López-Cruz, O. (2014). Probing the dark ages at $z \approx 20$: The SCI-HI 21 cm all-sky spectrum experiment. *The Astrophysical Journal Letters*, 782(1), L9.
- [2] <http://eor.berkeley.edu/>
- [3] Tingay, S. J., Goetze, R., Bowman, J. D., Emrich, D., Ord, S. M., Mitchell, D. A., ... Lonsdale, C. J. (2013). The Murchison widefield array: The square kilometre array precursor at low radio frequencies. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 30.
- [4] Richard Thompson, A., Moran, J. M., Swenson Jr, G. W. (2017). *Interferometry and synthesis in radio astronomy* (p. 872). Springer Nature.
- [5] <https://dictionary.cambridge.org/es-LA/dictionary/>
- [6] S. J. Arthur, *El Medio Interestelar* (2012).
- [7] Loeb, A. (2010). *How did the first stars and galaxies form?* (Vol. 1). Princeton University Press.
- [8] Pritchard, J. R., Loeb, A. (2012). 21 cm cosmology in the 21st century. *Reports on Progress in Physics*, 75(8), 086901.
- [9] Hogg, D. W. (1999). Distance measures in cosmology. arXiv preprint astro-ph/9905116.
- [10] <https://www.eso.org/public/spain/teles-instr/technology/interferometry/>
- [11] <http://krithika.gmrt.ncra.tifr.res.in/> [fecha de consulta Noviembre 2018].
- [12] <https://spain.skatelescope.org/>
- [13] Fundación Española para la ciencia y la Tecnología, Radioastronomía, PRINTSTATION. S.L. MADRID OCTUBRE 2003
- [14] Labeyrie, A., Lipson, S. G., Nisenson, P. (2006). *An introduction to optical stellar interferometry*. Cambridge University Press.
- [15] Jansen van Rensburg, J. P. (2012). *The design of a two-element correlation interferometer operating at L-band* (Doctoral dissertation, Stellenbosch: Stellenbosch University).

-
- [16] Fariña Carmona, J. E. (2010). Diseño y Construcción de la Etapa Analógica de un Interferómetro de Dos Antenas.
- [17] Sánchez Morales, P. A. (2013). Programación de una placa Roach como un correlador para un interferómetro cercano al infrarrojo.
- [18] Event Horizon Telescope Collaboration. (2019). First M87 event horizon telescope results. I. The shadow of the supermassive black hole. arXiv preprint arXiv:1906.11238.
- [19] Akiyama, K., Alberdi, A., Alef, W., Asada, K., Azulay, R., Baczko, A. K., ... Blackburn, L. (2019). First M87 event horizon telescope results. II. Array and instrumentation. *The Astrophysical Journal Letters*, 875(1), L2.
- [20] Azulay, R., Baczko, A. K., Ball, D., Baloković, M., Barrett, J., Bintley, D., ... Bremer, M. (2019). First M87 Event Horizon Telescope Results. III. Data Processing and Calibration. *The Astrophysical Journal Letters*, 875(L3), 32pp.
- [21] Akiyama, K., Alberdi, A., Alef, W., Asada, K., Azulay, R., Baczko, A. K., ... Blackburn, L. (2019). First M87 event horizon telescope results. IV. Imaging the central supermassive black hole. *The Astrophysical Journal Letters*, 875(1), L4.
- [22] Akiyama, K., Alberdi, A., Alef, W., Asada, K., Azulay, R., Baczko, A. K., ... Blackburn, L. (2019). First M87 event horizon telescope results. V. Physical origin of the asymmetric ring. *The Astrophysical Journal Letters*, 875(1), L5.
- [23] Akiyama, K., Alberdi, A., Alef, W., Asada, K., Azulay, R., Baczko, A. K., ... Blackburn, L. (2019). First M87 event horizon telescope results. VI. The shadow and mass of the central black hole. *The Astrophysical Journal Letters*, 875(1), L6.
- [24] <https://www.ni.com/es-mx/innovations/white-papers/06/understanding-ffts-and-windowing.html>
- [25] Smith, S. W. (1997). *The scientist and engineer's guide to digital signal processing*.
- [26] Price, D. C. (2016). Spectrometers and polyphase filterbanks in radio astronomy. arXiv preprint arXiv:1607.03579.
- [27] <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/reving/article/view/3496/5057>
- [28] David Smyth (2013), *Manual sobre Radioastronomía*, Tercera Edición.
- [29] Balanis, C. A. (2016). *Antenna theory: analysis and design*. John wiley sons.
- [30] Pozar, D. M. (2011). *Microwave engineering*. John wiley sons.
- [31] Palillero P. Salomón, Integración de la antena mango peel en un radiómetro para el proyecto SCI-HI, 2020, tesis en proceso.

-
- [32] Charles, K., Alexander, S. (2013). Fundamentos de Circuitos Electricos . McGraw-Hill Interamerican.
- [33] <https://www.electronics-notes.com/articles/antennas-propagation/vswr-return-loss/what-is-return-loss.php>
- [34] <https://www.minicircuits.com/pdfs/SHP-25+.pdf>
- [35] <https://www.minicircuits.com/pdfs/SLP-100+.pdf>
- [36] <https://www.minicircuits.com/pdfs/ZX60-33LN+.pdf>
- [37] Oppenheim, A. V., Schafer, R. W., Buck, J. R. (2011). Tratamiento de señales en tiempo discreto (Vol. 2). Prentice Hall.
- [38] <https://casper.ssl.berkeley.edu/wiki/ADC2x400-14>
- [39] <https://spain.skatelescope.org/ska-science/que-es-la-radioastronomia/>
- [40] Irarrázaval M. Pablo (2008), Análisis de Señales, Segunda Edición, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- [41] <https://www.pasternack.com/images/ProductPDF/TFT-402-LF.pdf>
- [42] Blake, R. (2004). Sistemas electrónicos de comunicaciones. Cengage Learning Editores.
- [43] <https://casper-toolflow.readthedocs.io/en/latest/blockdocumentation.html>
- [44] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1114.pdf>
- [45] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>
- [46] Le Vine, D., Skou, N. (2006). Microwave radiometer systems: design and analysis. Artech.
- [47] <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa4/n10/r3.html>

Apéndice A

Constancias de congreso

Se presentan las constancias de los congresos en los que fueron aceptados los trabajos realizados a lo largo del proyecto de tesis, siendo 2 artículos y la presentación de 1 póster:

7º Congreso Internacional de Robótica y Computación, CIRC 2020, presentado el 25 de mayo de 2020:

http://posgrado.lapaz.tecnm.mx/uploads/archivos/Libro_RoboticayComp2020.pdf

2do Congreso de Topics Avanzados de Óptica y Electrónica, presentado el día 26 de Noviembre de 2020.

29a. REUNION INTERNACIONAL DE COMUNICACIONES, COMPUTACION, ELECTRONICA, AUTOMATIZACION, ROBOTICA Y EXPOSICION INDUSTRIAL, evento pospuesto para julio de 2021.



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



**EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
A TRAVÉS DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE LA PAZ**

OTORGA LA PRESENTE

CONSTANCIA

A

**Luis Javier Ulloa Velazquez, Olga Felix Beltrán, Omar Lopez Cruz, Richard Torrealba
Melendez y German Ardul Muñoz**

Por su trabajo: **SCI-HI: Pruebas de un radiointerferómetro de dos elementos
implementado en Roach2 con ancho de banda 40-120MHz**
presentado en el Séptimo Congreso Internacional de Robótica y Computación

La Paz, B.C.S., a 25 de mayo de 2020.

Atentamente

"CIENCIA ES VERDAD, TÉCNICA ES LIBERTAD"

ING. JESÚS DAVID ESTRADA RUIZ
DIRECTOR





2do. Congreso de Tópicos Avanzados
de Óptica y Electrónica



El comité organizador del 2do. Congreso de Tópicos Avanzados de Óptica y Electrónica junto con la coordinación de Óptica del INAOE, otorga la presente constancia a:

LUIS JAVIER ULLOA VELAZQUEZ

por su participación con el trabajo "SCH-HI: Integración y pruebas de un radio interferómetro para dos antenas" en modalidad de póster el día 26 de noviembre del 2020.

Dr. Fermín Granados Salomón
Coordinador Departamento de Óptica INAOE

M.C. Hisse Ivonne Cázarez Aguilar
Presidenta OSA capítulo INAOE

Lic. Ana Elizabeth Espinoza Monex
Presidenta SPIE capítulo INAOE

M.C. Hans Israel Morales López
Presidente IEEE capítulo INAOE



Gobierno de Puebla
Hacer Puebla, mejorar Puebla



Universidad de Puebla



CA5

SPIE. STUDENT CHAPTER



OSA





ROC&C'2020

29ª. REUNION INTERNACIONAL DE
COMUNICACIONES, COMPUTACION,
ELECTRONICA, AUTOMATIZACION, ROBOTICA Y
EXPOSICION INDUSTRIAL.

PALACIO MUNDO IMPERIAL RIVIERA DIAMANTE
EXPO • FORUM • RESORT • PROMENADE
18 al 20 de Marzo de 2020.
Acapulco, Gro., México

México, D. F. a 13 de Febrero de 2020.

Luis Ulloa Velázquez, Olga Félix Beltrán, Omar López Cruz, Richard Torrealba Melendez, Germán Ardul Muñoz, Salomón Palillero Pérez
BENEMERITA UNIVERSIDAD AUTONOMA DE PUEBLA / INSTITUTO NACIONAL DE ASTROFISICA, OPTICA Y ELECTRONICA

Estimado Sr. Ulloa:

Nos es muy grato informar a usted, que su ponencia ha sido aceptada, para ser publicada en la memoria tradicional con ISBN nacional (sin publicación IEEE Xplore) de la, **29ª. REUNION INTERNACIONAL DE OTOÑO DE COMUNICACIONES, COMPUTACION, ELECTRONICA, AUTOMATIZACION, ROBOTICA Y EXPOSICION INDUSTRIAL, ROC&C'2020**, a celebrarse del **18 al 20 de Marzo del 2020**, en **Palacio Mundo Imperial Riviera Diamante Acapulco**.

CARTA COMPROMISO

Mediante este documento y de acuerdo con los **ESTATUTOS DEL IEEE** me comprometo a presentar personalmente la ponencia cuyo título es,

PONENCIA 56.- SCI-HI: IMPLEMENTACION DE UN RADIOINTERFEROMETRO DE DOS ELEMENTOS IMPLEMENTADO EN ROACH2 CON ANCHO DE BANDA 40-120MHZ

o bien, enviar a un representante con conocimientos suficientes del tema, notificando al **IEEE**, de este cambio, por lo menos 10 días antes del evento.

Atentamente,

Luis Javier Ulloa Velázquez

Luis Ulloa Velázquez, Olga Félix Beltrán, Omar López Cruz, Richard Torrealba Meléndez, Germán Ardul Muñoz, Salomón Palillero Pérez

IMPORTANTE: Para realizar los **TRAMITES DE INSCRIPCION AL EVENTO Y AL HOTEL**, **con mucho gusto, le anexamos la documentación correspondiente.**

El **IEEE Sección México** le extiende una muy cordial invitación a participar como **Moderador** en esta **ROC&C'2020**, moderando algunas de las **Sesiones Técnicas de su interés y especialidad**. En caso de aceptar ayudarnos, le suplicamos nos lo comunique, para considerarlo en el **Programa Técnico**.

Sin otro particular de momento, aprovechamos la ocasión para enviarle un cordial saludo y expresarle nuestro reconocimiento y gratitud por participar en la **ROC&C'2020**.

Atentamente,

M.C. César Fuentes Estrada

DIRECTOR CORPORATIVO DE INGENIERIA Y
PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA
CFE

PRESIDENTE
IEEE SECCION MÉXICO

Nota: Agradeceremos se sirva enviar por correo el siguiente documento debidamente firmado.

Apéndice B

Artículos

SCI-HI: Diseño de un radiointerferómetro de dos elementos implementado en Roach2 con ancho de banda 40-120MHz

Luis Javier Ulloa-Velazquez
Facultad de Ciencias de la Electrónica
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP)
 Puebla, México
 ulloa.200921740@gmail.com

Olga Félix-Beltrán
Facultad de Ciencias de la Electrónica (BUAP)
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
 Puebla, México
 olga.felix@correo.buap.mx

Omar López-Cruz
Coordinación de Astrofísica
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE)
 Tonantzintla, Puebla, México
 omarlx@inaoe.mx

Richard Torrealba-Melendez
Facultad de Ciencias de la Electrónica (BUAP)
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
 Puebla, México
 richard.torrealba@correo.buap.mx

Germán Ardul-Muñoz
Facultad de Ciencias de la Electrónica (BUAP)
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
 Puebla, México
 germanardul.munoz@correo.buap.mx

Salomón Palillero-Pérez
Facultad de Ciencias de la Electrónica (BUAP)
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
 Puebla, México
 salomon.palillero@alumno.buap.mx

Resumen—Se realiza la integración de un interferómetro de dos antenas para el experimento “Sonda cosmológica de la Isla” para la detección del Hidrógeno Neutro (SCI-HI) con un ancho de banda de 40MHz-120MHz. Este rango cubre a la emisión del hidrógeno neutro corrida al rojo entre $z = 20 - 11$, el sistema propuesto está basado en la plataforma de la tarjeta Roach2 con tecnología FPGA, misma que es programada mediante bloques de Simulink-Matlab y es la encargada de realizar el muestreo de las señales y su procesamiento obteniendo el espectro que resulta de interferir dos señales provenientes de diferentes antenas, se integra el front-end, es creada una interfaz de comunicación y visualización Roach-Raspberry a través del lenguaje de programación Python, por último se presentan las primeras pruebas en laboratorio de la integración del sistema haciendo el almacenamiento de datos de observación y monitoreo de variables de temperatura, variaciones de voltaje en el sistema y muestreo para un posterior análisis.

Index Terms—SCI-HI, Interferencia, antenas, roach2, espectro de radio, front-end, Simulink-Matlab, Python, Raspberry.

I. INTRODUCCIÓN

El proyecto SCI-HI es un proyecto mexicano con el objetivo de explorar la formación de las primeras estrellas en el universo. SCI-HI busca determinar inflexiones en el espectro integrado a distintas épocas (40-120 MHz) de la línea de 21 cm del hidrógeno neutro. Estas observaciones nos ayudarían a detectar la formación de las primeras estrellas, galaxias y fin de la *época oscura* del universo. El segundo prototipo que fue probado en la Reserva de la Biosfera Isla Guadalupe (lat:

$28^{\circ}58'24''$ N, lon: $118^{\circ}18'4''$ W) a unos 260 km de la península de Baja California. El instrumento constaba de una antena de banda ancha (Hibiscus) [1]. Para mejor la detección en cuanto a la eliminación de efectos sistemáticos [2] se propone un radio-interferómetro de 2 antenas con un nuevo diseño de antena (Mango Peel).

En la figura 1 se observa la evolución temporal de las fluctuaciones en el fondo de 21cm. Dependiendo del modelo, la coloración indica la intensidad de brillo de 21cm a medida que evoluciona a través de dos fases de absorción (azul marino y azul cielo) separados por un periodo (negro) donde la temperatura de excitación de la transición de hidrógeno de 21cm se desacopla de la temperatura del gas, antes de las transiciones a emisión (rojo) y finalmente desaparecen (negro) debido a la ionización del hidrógeno. SCI-HI busca la absorción que se observa alrededor de $z = 20$ (80 MHz), esto corresponde aproximadamente a unos 180 millones después del Big Bang, este espacio-tiempo ha permanecido inexplorado.

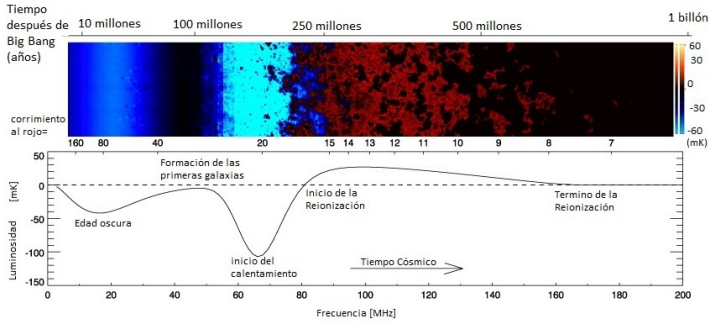


Figura 1. Características relevantes del tiempo cósmico, frecuencia y desplazamiento al rojo [3].

En el entorno de procesamiento de señales cósmicas la tendencia es la estandarización del hardware y software inclinándose a los equipos dedicados CASPER (Collaboration for Astronomy Signal processing and Electrónica Research). La placa Roach2¹ (Reconfigurable Open Architecture Computing Hardware 2) es un hardware de procesamiento independiente de FPGA basado en Virtex 6, cuenta con un PC embebido y varios bloques de memoria para la distribución de tareas e la FPGA a todos los dispositivos periféricos, el ADC con el que cuenta tiene una frecuencia de muestreo $F_s = 400MHz$, el código de programación se realiza mediante Simulink-Matlab a través de bloques prefabricados por CASPER². Para poder llevar la señal desde la antena hasta la entrada del ADC que contiene la Roach2 es necesario un una etapa de electrónica conocida como “front-end” compuesta por filtros pasivos dentro del rango de interés y amplificadores activos con ganancia considerable.

II. INTERFERÓMETRO

Un interferómetro elemental es considerado cuando dos antenas están separadas por una línea de base b y las señales de cada antena están denotadas por $v_{c1}(t)$ y $v_{c2}(t)$ previamente como se observa en la fig. 2, tomando en cuenta que los receptores son acondicionados para proporcionar cualquier amplificación y filtrado, posteriormente las señales entran a la etapa de interferencia

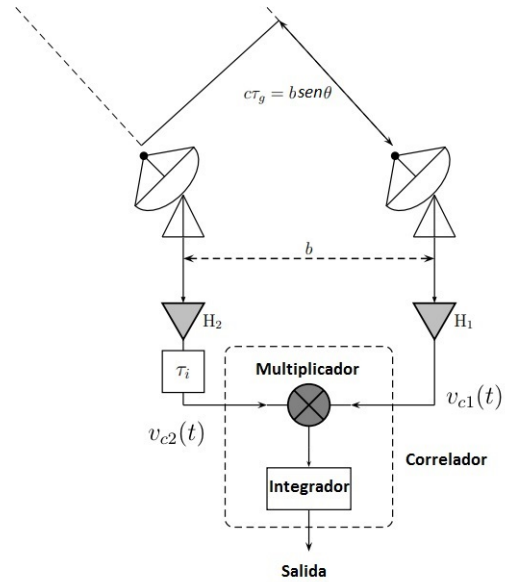


Figura 2. Esquema de un interferómetro de dos elementos simplificado, H_1 y H_2 representan la cadena de receptores integrados a su electrónica, τ_g es el retardo de tiempo geométrico y τ_i es el retardo de tiempo instrumental compensatorio [4].

El diagrama general implementado se describe en la fig. 3, mismo diseño que fue basado en los tutoriales que el grupo Casper publica y se utilizó como punto de partida³, el retardo instrumental compensatorio es realizado mediante un bloque que utiliza BRAM para su almacenamiento y es un retardo programable en tiempo de ejecución, por lo que el retardo está dado en ciclos de reloj, partiendo de la frecuencia de ejecución de la FPGA es de $100MHz$, por lo que por cada unidad de retraso la secuencia que entra al bloque será retrasada $10nSegundos$, esto nos ayuda a alinear una señal de datos específicos con otra señal que se encuentra retrasada por diferencia de longitud de recorrido desde la antena hasta el convertidor o por un ángulo de medición $Am \neq 0$ medido a partir del cenit. Se sabe que la velocidad de propagación de una onda que atraviesa una línea de transmisión es finita, puesto que la máxima velocidad que una onda puede tener es en el vacío y es conocida como $c = 300x10^6m/s$, la energía que se propaga en una línea de transmisión viaja a una velocidad menor a c , y está relacionada con el factor de velocidad [5]:

$$V_f = \frac{V_p}{c} \quad (1)$$

donde V_f es el Factor de velocidad, V_p es la Velocidad de propagación en la línea.

El factor de velocidad para una línea de transmisión depende casi por completo del dieléctrico que contiene dicha línea dada por:

$$V_f = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

¹<https://casper.ssl.berkeley.edu/wiki/ROACH2>

²https://casper.berkeley.edu/wiki/Main_Page

³https://casper-toolflow.readthedocs.io/projects/tutorials/en/latest/tutorials/snap/tut_spec.html#configuration-and-control

con ϵ_r como la permitividad relativa del dieléctrico, comúnmente los fabricantes incluyen la velocidad de propagación de los cables para RF, en este caso, para las pruebas se utiliza un cable con $V_f = 0,76$, por lo que se tiene una velocidad de propagación dada como:

$$V_p = 300 \times 10^6 m/s \times 0,76 = 228 \times 10^6 m/s \quad (3)$$

al saber el tiempo de retraso mínimo que nos genera el bloque y la velocidad de propagación en la línea de transmisión, podemos conocer la longitud que recorre la señal por unidad de retraso (1ns) o el retardo temporal necesario a una señal para poner ambas señales en fase a través de la ecuación:

$$D_l = V_p n_r b_r \quad (4)$$

donde D_l representa la diferencia de longitud del recorrido de las señales (en metros), n_r es el número de retardos aplicado al bloque (adimensional), b_r es la base de tiempo de retardo (1×10^{-9} segundos) equivalente un ciclo de reloj a la que trabaja la FPGA, misma que se establece a 1/4 de la frecuencia de muestreo del ADC. Por otro lado se realiza una pequeña calibración en amplitud, puesto que dada una señal de prueba a ambas entradas del ADC no cuantifican el mismo valor, se les agrega un offset programable para poner el punto de referencia de cada señal en cero.

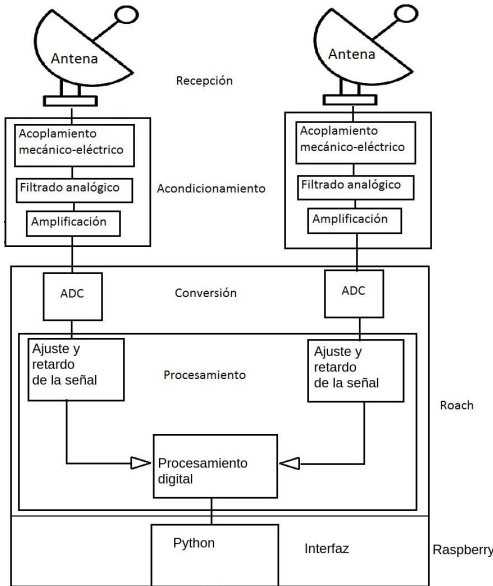


Figura 3. Esquema general del interferómetro a implementar, el acondicionamiento incluye el filtrado y amplificación analógica, la conversión analógica-digital es realizada a través del ADC de la Roach2, el procesamiento incluye los ajustes necesarios a la señal e interferirlas para obtener el espectro de interés, por último, mediante una Raspberry se realiza la interfaz y comunicación con lenguaje de programación Python.

El ancho de banda de un ADC está definido básicamente por la frecuencia de muestreo, que debe ser por lo menos dos veces la frecuencia máxima a procesar [6], por lo que basta una frecuencia de muestreo de $2B$ muestras/segundo, donde

B es el ancho de banda, se garantiza una reconstrucción perfecta para el límite de banda, entonces nuestro ancho de banda es $B = \frac{F_s}{2} = 200 MHz$, dado que el ADC tiene una resolución de 14 bits puede codificar entradas analógicas desde 0 hasta 16384 niveles diferentes, cabe agregar que la entrada de voltaje que admite dicho ADC es de $2,2V_{pp}$, al tomar como referencia central $0V$ el rango de voltaje admitido es de $-1,1V$ a $1,1V$, a partir de estos datos podemos conocer la resolución de voltaje llamada Q , dada por el límite de voltaje superior menos el límite de voltaje inferior dividido entre el número de niveles, por lo que se pueden cuantificar pasos de $134\mu V$.

II-A. Integración de la electrónica

En la figura 4 se observan los bloques de conexión entre los dispositivos electrónicos como suministro de energía eléctrica mediante banco de baterías, monitoreo de variaciones de temperatura en el entorno y caídas de voltaje en el suministro eléctrico que pueda hacer variar los resultados, se observa el control de dos switch para la conmutación entre las señales de las antenas y una carga de referencia, la etapa de front-end encargada de recibir y acondicionar la señal proveniente del espacio, que incluye detectar, filtrar y amplificar la señal, una señal de reloj es ingresada al ADC quien hereda una fracción de la frecuencia de reloj a la FPGA y envía también las señales recibidas por las antenas digitalizadas, por último podemos ver una Raspberry Pi, quien se encarga de realizar la extracción de información de la Roach2, el ADS1115, visualizar y almacenar toda la información recabada.

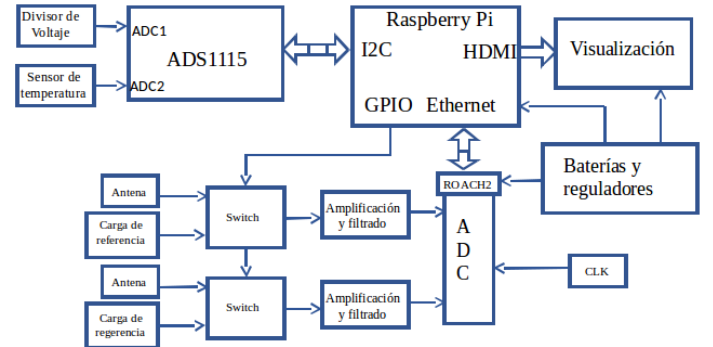


Figura 4. Esquema de la integración de la electrónica para su operación y monitoreo de variables.

II-B. Propuesta de diseño para procesamiento en Roach2

El diagrama que describe la estructura de programación implementada en la Roach2 se muestra en la fig. 5, la etapa de adc, offset y retardo es con el fin de acondicionar la señal para realizar su interferencia, donde son calibradas las señales en amplitud y desfasadas mediante un retardo programable, la interferencia se realiza través de un detector de ley cuadrada (potencia lineal), considerando que la tensión de la señal de una antena está representada por $V \sin(2\pi\nu_0 t)$, mientras que para la otra se considera un retardo temporal $\tau = (D/c) \sin \theta$, donde D es la distancia

entre la separación de las antenas, c la velocidad de la luz y θ es la posición angular de la fuente, por lo que la señal será $V \sin(2\pi\nu_0(t - \tau))$, entonces la salida del receptor que implementa el bloque interferencia se describe como [7]:

$$V_o = [V \sin(2\pi\nu_0 t) + V \sin(2\pi\nu_0(t - \tau))]^2 \quad (5)$$

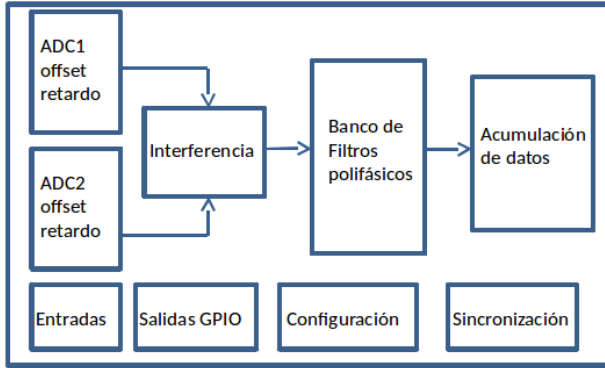


Figura 5. Esquema de la integración de la electrónica para su operación y monitoreo de variables.

La estructura de filtros polifásicos prototipo incluye la multiplicación de la función entrante por una función ventana y la señal es dividida en toques paralelos para aplicarles filtros de respuesta al impulso finito, seguida de una transformada rápida de Fourier, por último se implementa un acumulador de canales, donde los datos son tomados de la salida de la transformada rápida de Fourier y almacenada en registros par e impar hasta que se almacena el número de registros definidos por el usuario.

II-C. Interfaz

Para poder realizar la comunicación entre la Raspberry y la Roach2 se creó una interfaz mediante código de programación en Python que se ejecuta en Ubuntu mate 16 con el uso de funciones de la librería `corr`⁴ con dependencias de otros paquetes y que incluye funciones dedicadas a la comunicación hacia la Roach2, dicha interfaz esta diseñada para cargar el firmware diseñado previamente compilado, también detectar problemas de comunicación de sensores o desconexión de la Roach2, mediante un hilo diferente se crea un log que almacena los datos del espectro con el fin de realizar un análisis fuera de línea.

III. RESULTADOS DE INTEGRACIÓN

Se creó un ambiente de pruebas en laboratorio para realizar mediciones de integración del proyecto como se muestra en la fig. 6, dicho ambiente es realizado dentro de una jaula de Faraday con el objetivo de eliminar las señales provenientes de estaciones de radio cercanas que se encuentran dentro del ancho de banda de nuestro interés, el analizador de espectros es utilizado para comparar los detalles de un espectro obtenido por la Roach2 contra el mismo analizador, el

generador de señales 1 se utiliza para simular la recepción de una señal de muy baja potencia (antes de integrar la antena), mientras que el generador de señales 2 es utilizado como generador de señal de reloj hacia el ADC.

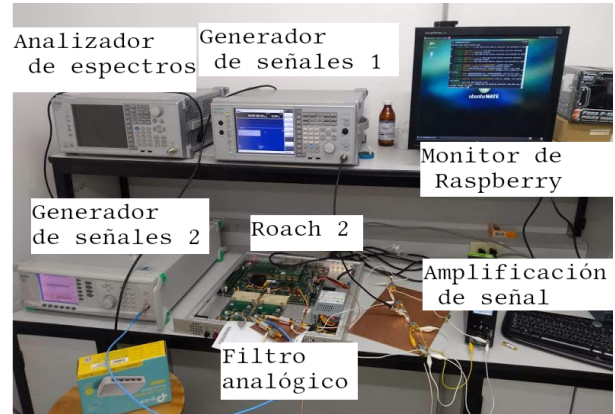


Figura 6. Ambiente de pruebas para las primeras implementaciones de diseño e integración.

Se ajusta el generador de señales que simula nuestra señal recibida con una potencia de $-80dBm$ a una frecuencia de $50MHz$, dicha señal es dividida mediante un conector tipo T para ingresar la misma señal a las dos entradas simulando la recepción en fase, mismo conector presenta atenuaciones en función de la frecuencia a tomar en cuenta mostradas en la tabla I

Frecuencia	Atenuación
40 MHz	44.4 dBm
80 MHz	38 dBm
100 MHz	34 dBm

Tabla I
ATENUACIÓN EN 3 DIFERENTES FRECUENCIAS.

las entradas de las dos señales y el resultado de hacerlas interferir se observan en la fig. 7, señales que se encuentran en el dominio del tiempo, a partir de dicha gráfica no es posible obtener información alguna por ser señales de muy pequeña potencia, donde el ruido presenta amplitud significativa que distorsiona nuestra señal, a diferencia de la fig. 8, que muestra el espectro del resultado de la interferencia, donde se puede apreciar un pequeño pico que indica la frecuencia de la señal presente en ambas entradas, y es un múltiplo de potencia, misma información que apenas es apreciable, cabe mencionar que aun no se han normalizado las señales en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia.

⁴<https://github.com/ska-sa/corr>

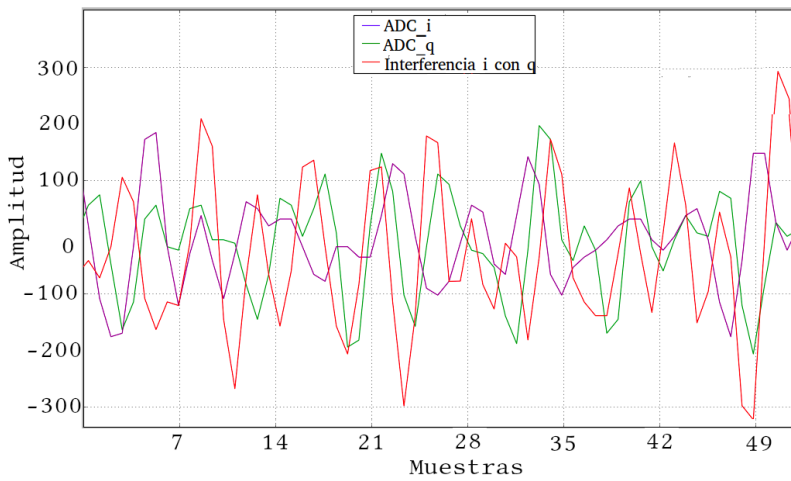


Figura 7. Visualización de dos señales ADC i (línea morada) y ADC q (línea verde) ambas de 50MHz junto con la señal de interferencia (línea roja), todas en el dominio del tiempo y de baja potencia.

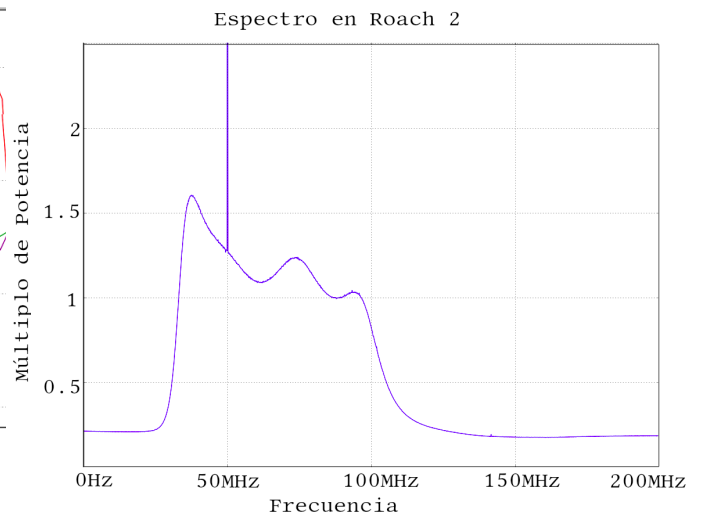


Figura 9. espectro a detalle de la interferencia de las señales recibidas en los ADC de la Roach2.

Para probar la captación de señales provenientes de emisoras de radio se realizaron pruebas sin conexión de alguna antena o generador y fuera de la jaula de Faraday, en la fig. 10 se observan varios picos en diferentes frecuencias y con diferentes amplitudes que muy probablemente son las señales de emisoras de radio como se esperaba, a pesar que no se cuenta con antena son muy marcadas.

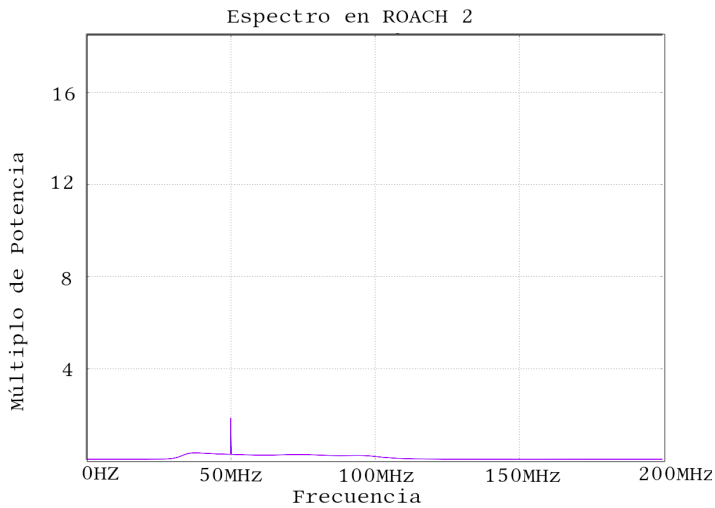


Figura 8. Espectro de la señal de interferencia de las señales que entran a los ADC de la Roach2.

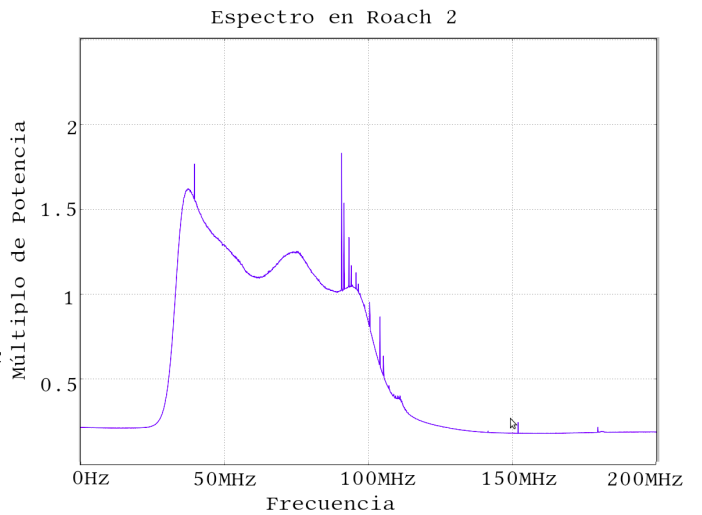


Figura 10. Espectro de ondas de radio en el ambiente con el diseño del interferómetro.

Al observar la gráfica a detalle podemos apreciar crestas correspondientes al ancho de banda formado por la etapa de front-end, resaltadas en la fig. 9, la forma que presenta el espectro incluye la respuesta de los filtros y las atenuaciones del conector T.

Con objetivo de comparar el diseño de un interferómetro y un diseño de una sola antena se muestra el resultado cuando el procesamiento toma la señal de una sola antena y obtiene su espectro, resultado que se observa en la fig. 11

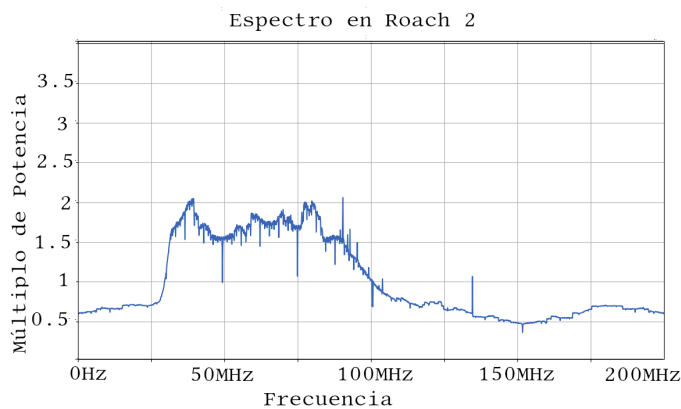


Figura 11. Espectro de ondas de radio en el ambiente con el diseño para una sola antena.

Si la misma configuración de front-end que se utilizó para las pruebas anteriores se conecta a un analizador de espectro (Anritsu S2830A) nos muestra menor información que los diseños en la Roach2.

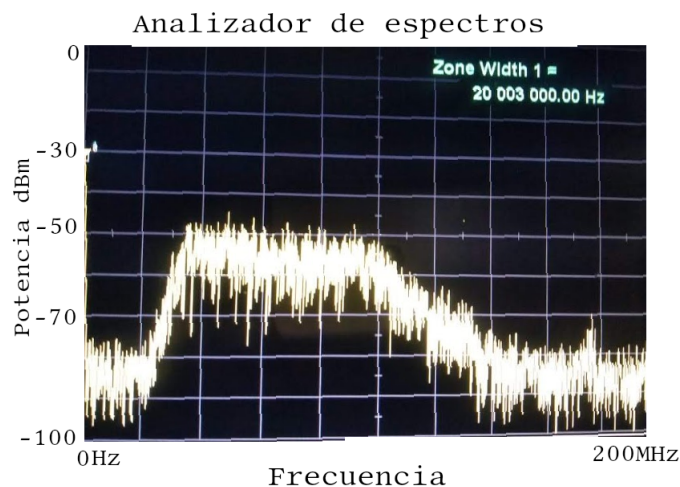


Figura 12. Espectro de señales de radio en el medio ambiente local captado por un analizador de espectros Anritsu S2830A con la señal tomada del front-end implementado.

IV. CONCLUSIONES

Hasta este punto se ha logrado realizar la integración del interferómetro de dos elementos junto con su interfaz para la comunicación y visualización, cabe mencionar que el software se encuentra en sus primeras versiones, por lo que se contemplan algunas mejoras de programación. Aunque las pruebas de integración no fueron realizadas con la antena a utilizar, se logró observar el espectro de una señal inducida mediante un generador de señales y las señales de radio que se creen son de radio difusoras en la zona, se realizó la comparación entre el resultado del diseño del interferómetro, el diseño para una sola antena y la información que muestra un espectro, visualmente comprobable que tiene mejor respuesta el interferómetro, es posible indicar que para realizar una observación más precisa

se debe saber diferenciar la señal esperada del ruido debido a los componentes del sistema, inserciones por fenómenos naturales e inclusive interferencias por origen humano, en mediciones, la estrategia de orientación de la antena o un mal retardo de la señal para su análisis puede ser también los culpables de un mal resultado del procesamiento de la señal, por lo que mediante los logs que se van generando de la señal y su espectro a través de la interfaz un siguiente paso en el trabajo será realizar la promediación de las muestras tomadas a lo largo de un tiempo, conocido como tiempo de integración, por lo que entre más tiempo de observación se tenga, más marcadas serán las señales del continuo.

REFERENCIAS

- [1] Voytek, T. C., Natarajan, A., Jáuregui García, J. M., Peterson, J. B., & López-Cruz, O. 2014, *Astrophysical Journal Letters*, 782, L9
- [2] Liu, A., Pritchard, J. R., Tegmark, M., et al. 2013, *Physical Review D*, 87, 043002
- [3] 21 cm cosmology in the 21st century, Jonathan R Pritchard and Abraham Loeb, 2012.
- [4] Juan- Pierre Jansen van Rensburg, The design of a two-element correlation interferometer operating at L-band, Stellenbosch University, 2012.
- [5] Blake & Roy, *Sistemas electrónicos de comunicaciones*, Thomson, 2014.
- [6] Irarrázaval M. Pablo, *Análisis de Señales*, Segunda Edición, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Pontificia Universidad Católica de Chile, 2008.
- [7] *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy*, A. R. Thompson, J. M. Moran, and G. W. Swenson, Jr, 2012. Wiley, New York, 2nd edition, 2001.



RESUMEN

En este documento se presenta el diagrama de integración de un radio-interferómetro para trabajar en un ancho de banda de 40MHz a 120MHz, se muestra el esquema que se implementa en el firmware, desarrollado en la plataforma de la tarjeta ROACH2 con tecnología FPGA, así como el software desarrollado en Python para la comunicación y operación de la ROACH2, además de permitir almacenar los espectros adquiridos y realizar un análisis estadístico posterior, por último se presentan las pruebas de laboratorio del sistema.

INTRODUCCIÓN

El experimento *Sonda Cosmológica de las Islas para la Detección de Hidrógeno Neutro* (SCI-HI) es un proyecto mexicano que busca la detección de la formación de las primeras estrellas en el universo, busca detectar por primera vez las fluctuaciones en el fondo de 21cm observado en la Figura 1, buscando la absorción que se observa alrededor de $z=20$, espacio-tiempo que ha permanecido inexplorado.

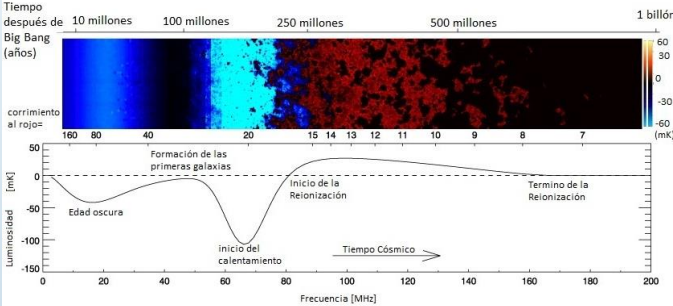


Figura 1. Características relevantes del tiempo cósmico, frecuencia y desplazamiento al rojo [1].

El primer prototipo fue probado en la Reserva de la Biósfera Isla Guadalupe, a unos 260 km de la península de Baja California; el instrumento constaba de una antena de banda ancha (Hibiscus) [2].

Para mejorar la detección en cuanto a la eliminación de efectos sistemáticos [3] se propone un radio-interferómetro de 2 antenas para obtener una resolución angular de 10 grados. La Figura 2 es el diagrama esquemático del interferómetro, el procesamiento incluye los ajustes necesarios a la señal e interferirlas para obtener el espectro de interés, mediante una PC se realiza la interfaz y comunicación.

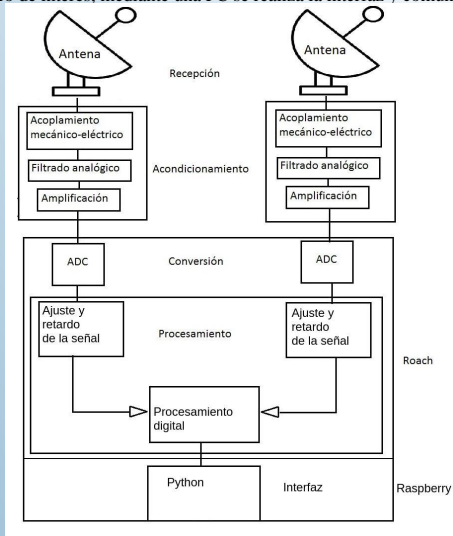


Figura 2. Diagrama de integración del interferómetro para 2 antenas.

DESAROLLO

Se presenta la interconexión de los diferentes dispositivos electrónicos que conforman el sistema, el propósito es tener un instrumento portátil, en la Figura 3 se muestra la distribución de los dispositivos, mientras que en la Figura 4 se observa el diagrama que describe la programación del firmware.

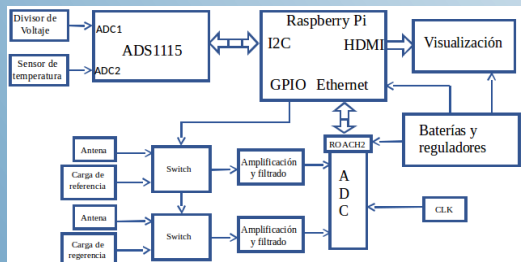


Figura 3. Esquema de integración de la electrónica.

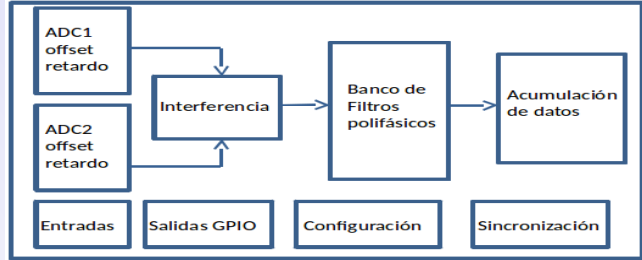


Figura 4. Diagrama que describe la programación del firmware de la ROACH2.

PRUEBAS

En una primera prueba se induce una señal de 80MHz mediante una antena con una potencia de -138dBm, dicha prueba se realiza dentro de una jaula de Faraday, esto con el objetivo de eliminar señales no deseadas, se realiza la comparación entre un espectro obtenido en un instante de tiempo y el análisis estadístico de la toma de espectros durante 10 minutos, en la Figura 5 se observa la comparación de los resultados, pudiendo apreciar la reducción de los niveles de ruido al paso del tiempo, una segunda prueba se realiza tomando los espectros que se encuentran en el ambiente (fuera de la jaula), dentro de la ciudad de Puebla, mostrado en la Figura 6, observando las señales de las emisoras de radio cercanas que emiten dentro de nuestro ancho de banda.

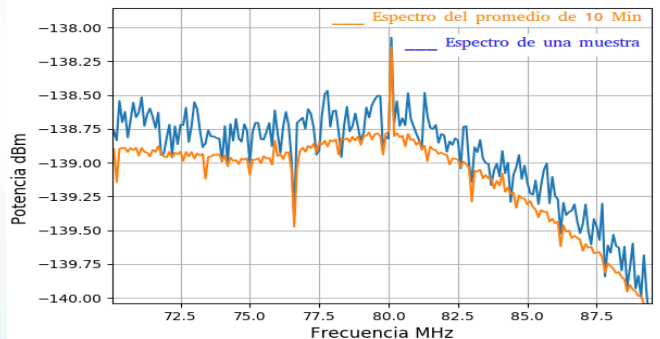


Figura 4. Comparación del espectro tomado en un instante de tiempo (Azul), contra el espectro que resulta del promedio de 238 muestras tomadas en un intervalo de 10 minutos (Naranja).

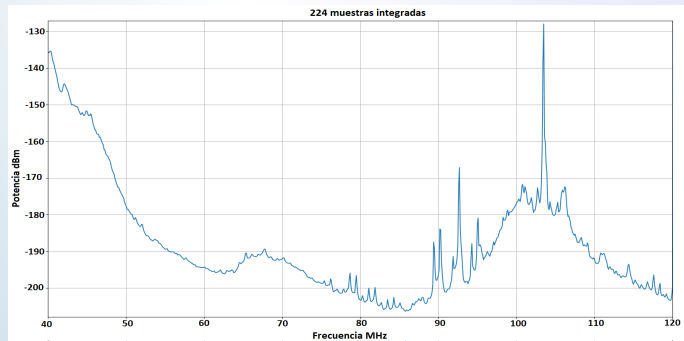


Figura 5. Espectro resultante del promedio de 224 muestras fuera de la jaula de Faraday, mostrando las frecuencias de las emisoras de radio cercanas.

CONCLUSIONES

Se obtuvo una primera integración satisfactoria, aunque la implementación del sistema quedan sujetas a cambios requeridos al momento de hacer mediciones de campo, como pudiera ser aumentar las ganancias de amplificación y contrarrestar los efectos de la respuesta de la electrónica en ambiente fuera de laboratorio.

REFERENCIAS

- [1] 21 cm cosmology in the 21st century, Jonathan R Pritchard and Abraham Loeb, 2012.
- [2] Voytek, T. C., Natarajan, A., J auregui García, J. M., Peterson, J. B., & López-Cruz, O. 2014, Astrophysical Journal Letters, 782, L9.
- [3] Liu, A., Pritchard, J. R., Tegmark, M., et al. 2013, Physical Review D, 87, 043002.

SCI-HI: Pruebas de un radiointerferómetro de dos elementos implementado en Roach2 con ancho de banda 40-120MHz

Luis Javier Ulloa-Velazquez
Facultad de Ciencias de la Electrónica
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP)
Puebla, México
ulloa.200921740@gmail.com

Omar López-Cruz
Coordinación de Astrofísica
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE)
Tonantzintla, Puebla, México
omarlx@inaoep.mx

Germán Ardul-Muñoz
Facultad de Ciencias de la Electrónica (BUAP)
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Puebla, México
germanardul.munoz@correo.buap.mx

Olga Félix-Beltrán
Facultad de Ciencias de la Electrónica (BUAP)
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Puebla, México
olga.felix@correo.buap.mx

Richard Torrealba-Melendez
Facultad de Ciencias de la Electrónica (BUAP)
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Puebla, México
richard.torrealba@correo.buap.mx

Resumen—Se realizan las pruebas de integración de un interferómetro de dos antenas para el experimento “Sonda cosmológica de la Isla” para la detección del Hidrógeno Neutro (SCI-HI) con un ancho de banda de 40MHz-120MHz. El sistema propuesto está basado en la plataforma de la tarjeta Roach2 con tecnología FPGA, es mostrado el diagrama eléctrico-electrónico general de su implementación así como el diagrama de bloques que se implementa dentro de la Roach2, es creada una interfaz de comunicación y visualización Roach2-PC a través del lenguaje de programación Python, encargada de cargar el archivo de programación a dicha tarjeta, ajustar las señales y crear archivos log para su posterior análisis, se muestra una segunda interfaz encargada de tomar los archivos log y realizar una promediación de los espectros almacenados en un tiempo dado de muestreo.

Index Terms—SCI-HI, Interferencia, antenas, roach2, espectro de radio, front-end, Simulink-Matlab, Python.

I. INTRODUCCIÓN

El proyecto SCI-HI es un proyecto mexicano con el objetivo de explorar la formación de las primeras estrellas en el universo. SCI-HI busca determinar inflexiones en el espectro integrado a distintas épocas (40-120 MHz) de la línea de 21 cm del hidrógeno neutro. Estas observaciones nos ayudarían a detectar la formación de las primeras estrellas, galaxias y fin de la *época oscura* del universo. El segundo prototipo que fue probado en la Reserva de la Biosfera Isla Guadalupe (lat: 28°58'24" N, lon: 118°18'4" W) a unos 260 km de la península de Baja California. El instrumento constaba de una antena de banda ancha (Hibiscus) [1]. En la Fig. 1 se

observa la evolución temporal de las fluctuaciones en el fondo de 21cm. SCI-HI busca la absorción que se observa alrededor de $z = 20$ (80 MHz), esto corresponde aproximadamente a unos 180 millones de años después del Big Bang, este espacio-tiempo ha permanecido inexplorado.

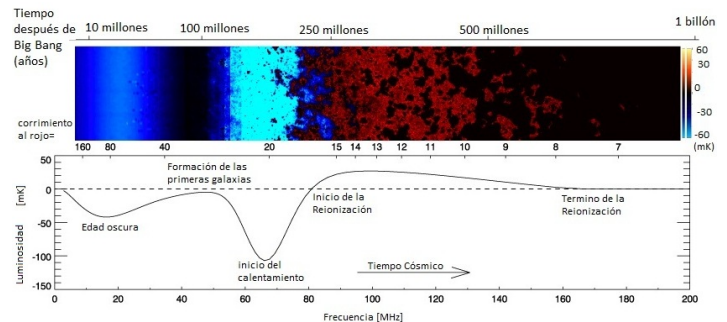


Figura 1. Características relevantes del tiempo cósmico, frecuencia y desplazamiento al rojo [2].

Para mejorar la detección en cuanto a la eliminación de efectos sistemáticos [3] se propone un radio-interferómetro de 2 antenas con una nuevo diseño de antena (Mango Peel) representado en la figura 2, el diseño que fue basado en los tutoriales que el grupo Casper publica y se utilizó como

punto de partida¹, el retardo instrumental compensatorio es realizado mediante un bloque que utiliza BRAM para su almacenamiento y es un retardo programable en tiempo de ejecución, por lo que el retardo está dado en ciclos de reloj, partiendo de la frecuencia de ejecución de la FPGA que es de 100MHz, entonces cada unidad de retraso de la secuencia de señal que entra al bloque será retardada $10n$ Segundos, esto nos ayuda a alinear una señal de datos específicos con otra señal que se encuentra retrasada por diferencia de longitud de recorrido desde la antena hasta el convertidor o por un ángulo de medición $Am \neq 0$ medido a partir del cenit.

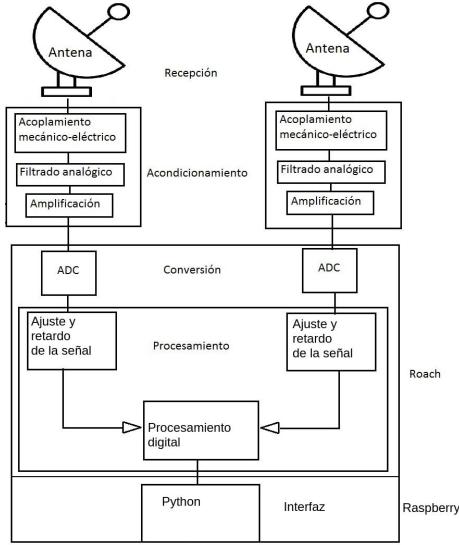


Figura 2. Esquema general del interferómetro implementado, el procesamiento incluye los ajustes necesarios a la señal e interferirlas para obtener el espectro de interés, mediante una PC se realiza la interfaz y comunicación con lenguaje de programación Python.

El procesamiento de las señales cósmicas se realiza con equipos dedicados CASPER² (Collaboration for Astronomy Signal processing and Electronics Research), en específico con la placa Roach2³ (Reconfigurable Open Architecture Computing Hardware 2) que es un hardware de procesamiento independiente de FPGA basado en Virtex 6, cuenta con un PC embebido y varios bloques de memoria para la distribución de tareas de la FPGA a todos los dispositivos periféricos, el ADC con el que se trabaja tiene una frecuencia de muestreo $F_s = 400\text{MHz}$, el código de programación se realiza mediante Simulink-Matlab a través de bloques prefabricados por CASPER y Xilinx. Para poder llevar la señal desde la antena hasta las entradas del ADC que contiene la Roach2 es necesario una etapa de electrónica compuesta por filtros pasivos dentro del rango de interés y amplificadores activos con ganancias considerables.

¹https://casper-toolflow.readthedocs.io/projects/tutorials/en/latest/tutorials/snap/tut_spec.html#configuration-and-control

²https://casper.berkeley.edu/wiki/Main_Page

³<https://casper.ssl.berkeley.edu/wiki/ROACH2>

II. INTERFERÓMETRO

Se considera un interferómetro cuando se hace interferir las señales captadas por dos antenas diferentes denotadas por $v_{c1}(t)$ y $v_{c2}(t)$, con dichas antenas separadas por una línea de base b como se observa en la Fig. 3, tomando en cuenta que los receptores son acondicionados para proporcionar cualquier amplificación y filtrado en las frecuencias de interés.

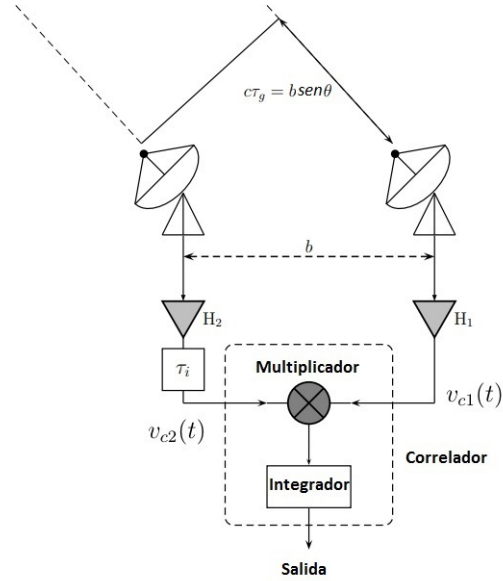


Figura 3. Esquema de un interferómetro de dos elementos simplificado, H_1 y H_2 representan la cadena de receptores integrados a su electrónica, τ_g es el retardo de tiempo geométrico y τ_i es el retardo de tiempo instrumental compensatorio [4].

Se sabe que la velocidad de propagación de una onda que atraviesa una línea de transmisión es finita, puesto que la máxima velocidad que una onda puede tener es en el vacío y es conocida como $c = 300 \times 10^6 \text{ m/s}$, la energía que se propaga en una línea de transmisión viaja a una velocidad menor a c , y está relacionada con el factor de velocidad [5]:

$$V_f = \frac{V_p}{c} \quad (1)$$

donde V_f es el Factor de velocidad, V_p es la Velocidad de propagación en la línea.

El factor de velocidad para una línea de transmisión depende casi por completo del dieléctrico que contiene dicha línea dada por:

$$V_f = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

con ϵ_r como la permitividad relativa del dieléctrico, comúnmente los fabricantes incluyen la velocidad de propagación de los cables para RF, en este caso, para las pruebas se utiliza un cable con $V_f = 0,76$, por lo que se tiene una velocidad de propagación dada como:

$$V_p = 300 \times 10^6 \text{ m/s} \times 0,76 = 228 \times 10^6 \text{ m/s} \quad (3)$$

al saber el tiempo de retraso mínimo que nos genera el bloque y la velocidad de propagación en la línea de transmisión, podemos conocer la longitud que recorre la señal por unidad de retraso (1ns) o el retardo temporal necesario a una señal para poner ambas señales en fase a través de la ecuación:

$$D_l = V_p n_r b_r \quad (4)$$

donde D_l representa la diferencia de longitud del recorrido de las señales (en metros), n_r es el número de retardos aplicado al bloque (adimensional), b_r es la base de tiempo de retardo (1×10^{-9} segundos) equivalente un ciclo de reloj a la que trabaja la FPGA, misma que se establece a $1/4$ de la frecuencia de muestreo del ADC. Por otro lado se realiza una pequeña calibración en amplitud, puesto que dada una señal de prueba a ambas entradas del ADC no cuantifican el mismo valor, por lo que se les agrega un offset programable para poner el punto de referencia de cada señal en cero.

El ancho de banda de un ADC está definido básicamente por la frecuencia de muestreo, que debe ser por lo menos dos veces la frecuencia máxima a procesar [6], por lo que basta una frecuencia de muestreo de $2B$ muestras/segundo, donde B es el ancho de banda, se garantiza una reconstrucción perfecta para el limite de banda, entonces el ancho de banda del ADC es $B = \frac{F_s}{2} = 200MHz$, dado que el ADC tiene una resolución de 14 bits puede codificar entradas analógicas desde 0 hasta 16384 niveles diferentes, cabe agregar que la entrada de voltaje que admite dicho ADC es de $2,2V_{pp}$, al tomar como referencia central $0V$ el rango de de voltaje admitido es de $-1,1V$ a $1,1V$, a partir de estos datos podemos conocer la resolución de voltaje llamada Q , dada por el limite de voltaje superior menos el limite de voltaje inferior dividido entre el numero de niveles, por lo que se pueden cuantificar pasos de $134\mu V$.

II-A. Integración de la electrónica y propuesta de diseño para procesamiento en Roach2

La propuesta de la electrónica que se contempla al final del proyecto se encuentra descrita en la Fig. 4, mismo que se pretende sea portable en las etapas finales, esto facilitará su traslado y eliminaría el ruido eléctrico inducido por la corriente de línea (120V AC) requerida por las fuentes de los diferentes dispositivos como los amplificadores, señal de reloj e inclusive la misma Roach2.

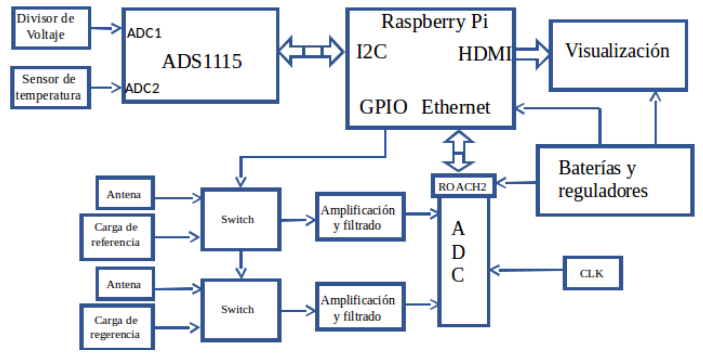


Figura 4. Esquema general de la electrónica para su operación, suministro de energía eléctrica, monitoreo de variaciones de temperatura en el entorno y caídas de voltaje en el suministro eléctrico que pueda hacer variar los resultados, control de dos switch para la conmutación entre las señales de las antenas y una carga de referencia, la etapa de front-end que incluye detectar, filtrar y amplificar la señal, señal de reloj ingresada al ADC quien hereda una fracción de la frecuencia de reloj a la FPGA, mini PC Rasperry Pi, quien se encarga de realizar la extracción de información de la Roach2, visualizar y almacenar toda la información recabada.

En la Fig. 5 se observa el diagrama que describe la estructura de programación que se implementa en la roach2, la etapa de adc, offset y retardo es con el fin de acondicionar la señal para realizar su interferencia, donde son calibradas las señales en amplitud y desfasadas mediante un retardo programable, la interferencia se realiza través de un detector de ley cuadrada (potencia lineal), considerando que la tensión de la señal de una antena está representada por $V \sin(2\pi v_0 t)$, mientras que para la otra se considera un retardo temporal $\tau = (D/c) \sin \theta$, donde D es la distancia entre la separación de las antenas, c la velocidad de la luz y θ es la posición angular de la fuente, por lo que la señal será $V \sin(2\pi v_0 (t - \tau))$, entonces la salida del receptor que implementa el bloque interferencia se describe como [7]:

$$V_o = [V \sin(2\pi v_0 t) + V \sin(2\pi v_0 (t - \tau))]^2 \quad (5)$$

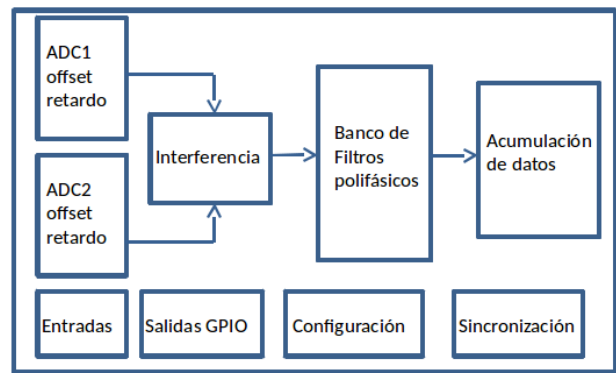


Figura 5. Esquema de la integración de la electrónica para su operación y monitoreo de variables.

La estructura de filtros polifásicos prototipo incluye la multiplicación de la función entrante por una función ventana y la señal es dividida en toques paralelos para aplicarles filtros de respuesta al impulso finito, seguida de una transformada

rápida de Fourier, por último se implementa un acumulador de canales, donde los datos son tomados de la salida de la transformada rápida de Fourier y almacenada en registros par e impar hasta que se almacena el número de registros definidos por el usuario.

II-B. Interfaz

La comunicación entre la PC y la Roach2 se realiza mediante una interfaz desarrollada en Python con el uso de funciones de la librería corr⁴ que incluye funciones dedicadas a la comunicación PC-Roach2, en la Fig. 6 se muestra la pantalla principal de la comunicación PC-Roach2.

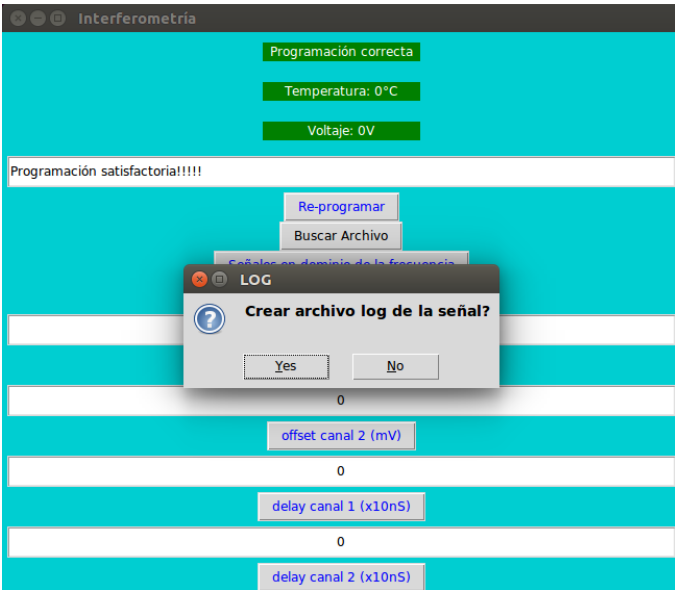


Figura 6. Ventana principal de la interfaz PC-Roach2, en un paso posterior se pretende obtener variables asociadas a la Roach2 como voltaje y temperatura.

La anterior interfaz está hecha para cargar el firmware diseñado en Simulink previamente compilado, botones para el ajuste de la señales que incluye retardo programable y offset para mantener dichas señales en fase, mediante un hilo diferente se crea un log que almacena los datos del espectro con el fin de realizar un análisis fuera de línea, por lo que fue creada una segunda interfaz de promediación mostrada en la Fig. 7, donde se carga el log de los espectros almacenados y se realiza la promediación de todas esas muestras, al final podemos obtener una gráfica de un ancho de banda específico dentro de los 40 a 120MHz.

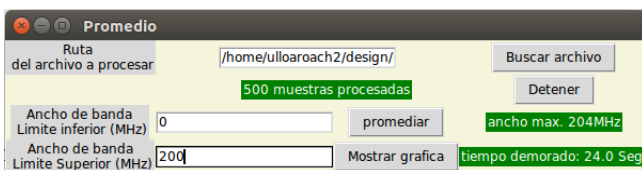


Figura 7. Interfaz para analizar los datos almacenados en un archivo log.

⁴<https://github.com/ska-sa/corr>

III. PRUEBAS DE INTEGRACIÓN

Para realizar mediciones de integración del interferómetro se tiene un ambiente de pruebas en laboratorio mostrado en la Fig. 8, dicho ambiente es realizado dentro de una jaula de Faraday con el objetivo de eliminar las señales provenientes de estaciones de radio cercanas que se encuentran dentro del ancho de banda de nuestro interés, el analizador de espectros es utilizado para comparar los detalles de un espectro obtenido por la Roach2 contra el mismo analizador, el generador de señales 1 se utiliza para simular la recepción de una señal de muy baja potencia (antes de integrar la antena), mientras que el generador de señales 2 es utilizado como generador de señal de reloj hacia el ADC.

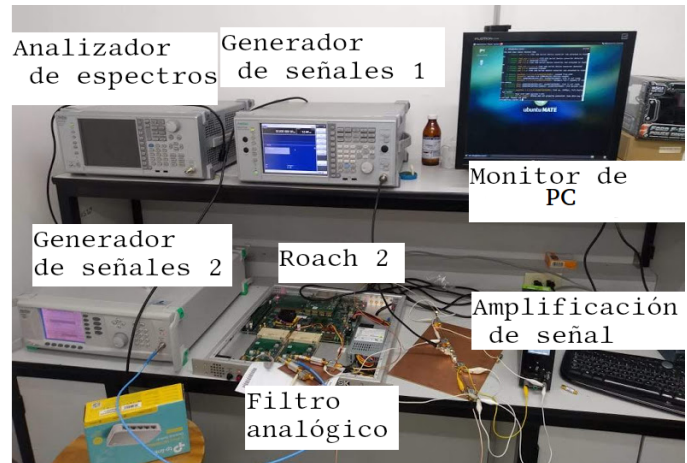


Figura 8. Ambiente de pruebas para las primeras implementaciones de diseño e integración.

Se ajusta el generador de señales que simula nuestra señal recibida con una potencia de $-100dBm$ a una frecuencia de $80MHz$, dicha señal es dividida mediante un conector tipo T para ingresar la misma señal a las dos entradas simulando la recepción en fase, mismo conector presenta atenuaciones en la practica de $38dBm$, por lo tanto se tiene que la potencia de la señal de prueba será de $\approx -138dBm$, en la Fig. 9 se observa el espectro con ancho de banda de $40 - 120MHz$, la forma de la gráfica incluye la respuesta del filtrado, amplificado y atenuación del sistema electrónico, a partir de dicha gráfica apenas es posible observar la señal inducida, al realizar un zoom en la frecuencia deseada que se observa en la Fig. 10, dentro de las variaciones en diferentes frecuencias podemos observar que sobresale un pico en los $80MHz$.

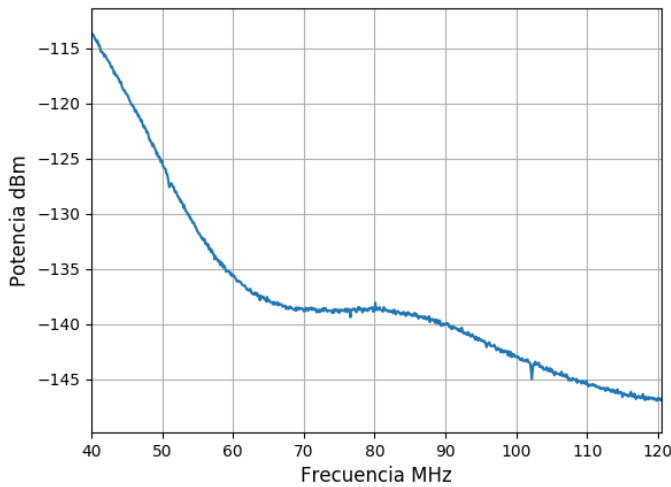


Figura 9. Espectro de un ancho de banda de 40 – 120MHz, la forma de la respuesta incluye los efectos debido a la electrónica de "front-end", principalmente a la de los filtros pasivos, difícilmente es posible indicar que frecuencia es ruido y cuál es inducida.

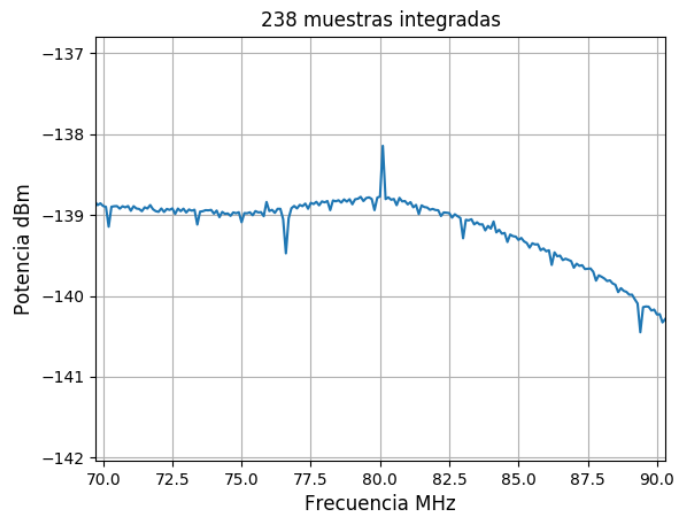


Figura 11. Espectro de una fracción del ancho de banda, con un promedio de observación de 10 minutos.

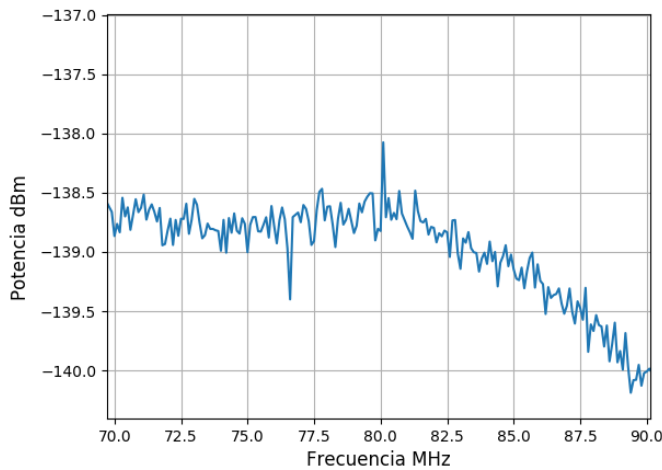


Figura 10. Espectro de un ancho de banda acotado, donde se puede apreciar una señal marcada en los 80MHz en un instante de tiempo.

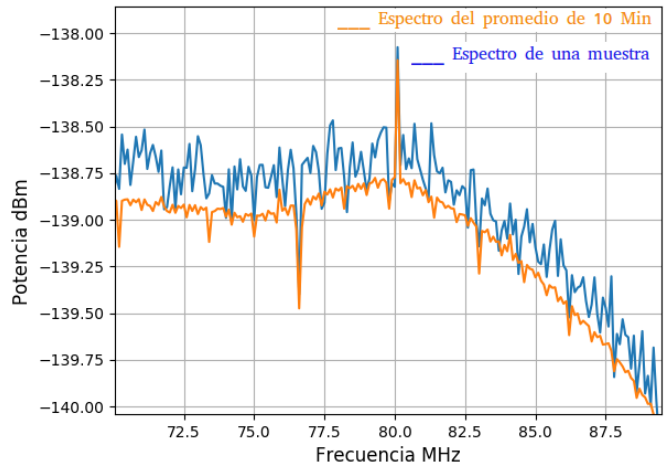


Figura 12. Comparación del espectro tomado en un instante de tiempo (azul) contra el espectro que resulta de promediar 238 muestras equivalente a 10 min de muestreo (naranja).

Al tener el sistema realizando mediciones de los espectros y almacenarlos durante 10 minutos, obteniendo el promedio de esas muestras se puede observar que los niveles de ruido se reducen y se remarca la señal que fue inducida, mismo que se observó en la Fig. 11, por otro lado en la Fig. 12 podemos apreciar la comparación de la misma fracción de ancho de banda, donde es más apreciable que existen señales en ciertas frecuencias que son remarcadas en el promedio y difícilmente observar en una sola muestra.

IV. CONCLUSIONES

Hasta este punto se ha logrado realizar la integración del interferómetro de dos elementos junto con su interfaz para la comunicación, visualización y almacenamiento de datos, además del programa que realiza la promediación de los datos almacenados.

A pesar de que las pruebas de integración no fueron realizadas con la antena a utilizar, se logró observar el espectro de una señal inducida de potencia por debajo del ruido mediante un generador de señales, misma que se remarca al realizar la promediación de los datos al mismo tiempo que las componentes espectrales del ruido desaparecen, es posible indicar que para realizar una observación más precisa se debe saber diferenciar la señal esperada del ruido debido a los componentes del sistema, inserciones por fenómenos naturales e inclusive interferencias por origen humano, mientras más

prolongado sea el tiempo de recolección de datos mas fiable serán los resultados promediados, en mediciones, la estrategia de orientación de la antena o un mal retardo de la señal para su análisis puede ser también los culpables de un mal resultado del procesamiento de la señal, por lo que mediante los logs que se van generando de la señal y su espectro a través de la interfaz un siguiente paso en el trabajo será realizar la promediación de las muestras tomadas a lo largo de un tiempo, conocido como tiempo de integración, por lo que entre más tiempo de observación se tenga, más marcadas serán las señales del continuo.

REFERENCIAS

- [1] Voytek, T. C., Natarajan, A., Jáuregui García, J. M., Peterson, J. B., & López-Cruz, O. 2014, *Astrophysical Journal Letters*, 782, L9
- [2] 21 cm cosmology in the 21st century, Jonathan R Pritchard and Abraham Loeb, 2012.
- [3] Liu, A., Pritchard, J. R., Tegmark, M., et al. 2013, *Physical Review D*, 87, 043002
- [4] Juan- Pierre Jansen van Rensburg, The design of a two-element correlation interferometer operating at L-band, Stellenbosch University, 2012.
- [5] Blake & Roy, *Sistemas electrónicos de comunicaciones*, Thomson, 2014.
- [6] Irarrázaval M. Pablo, *Análisis de Señales*, Segunda Edición, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Pontificia Universidad Católica de Chile, 2008.
- [7] *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy*, A. R. Thompson, J. M. Moran, and G. W. Swenson, Jr, 2012. Wiley, New York, 2nd edition, 2001.