



Informe 4

Laboratorio de Interferometría

Integrantes:	Francisco Muñoz Diego Espinoza
Profesor:	Leonardo Bronfman A. Walter Max-Moerbeck A.
Auxiliar:	Boris Cuevas
Fecha de entrega:	29 de abril de 2024 Santiago, Chile

Índice de Contenidos

1. Introducción	1
2. Marco teórico	2
3. Resultados y Análisis	4
4. Discusión	10
5. Conclusiones	12

Índice de Figuras

1. Interferómetro de dos elementos.	2
2. Promedio de los canales espectrales.	4
3. Datos no separados.	4
4. Datos separados del correspondientes al amanecer y al atardecer respectivamente.	5
5. Mapa potencia logarítmico antena poniente [[1]].	5
6. Temperatura medida por el interferómetro al amanecer y atardecer, respectivamente, con los datos obtenidos a baja elevación filtrados.	6
7. Transformada de Fourier de los datos sin los periodos largos y sin la componente DC para el amanecer y atardecer respectivamente.	6
8. Anti-transformada de Fourier de los datos sin los periodos largos y sin la componente DC para el amanecer y atardecer respectivamente.	7
9. Anti-transformada de Fourier de los datos sin los periodos largos y sin la componente DC para el amanecer y atardecer, respectivamente, en función del largo en metros de la línea base.	7
10. Aquí se muestra algo que debería dar para el ajuste de la función visibilidad, como la envolvente por arriba del espectro de temperatura, donde en el eje x se muestra la apertura del interferómetro, que en el caso de este informe, es B_S [1]	8
11. A la izquierda y a la derecha respectivamente, se muestra el ajuste de la visibilidad con los datos y sin ellos (para ver la función ajuste), para el amanecer. En el eje x e y respectivamente, la temperatura de la antena y la línea de base.	9
12. A la izquierda y a la derecha respectivamente, se muestra el ajuste de la visibilidad con los datos y sin ellos (para ver la función ajuste), para el atardecer. En el eje x e y respectivamente, la temperatura de la antena y la línea de base.	9

1. Introducción

En el presente informe se presenta los resultados obtenidos de la última tarea del curso Astronomía Experimental (*AS3201-1*). Los objetivos de esta experiencia se centran en que con el trabajo sobre los datos entregados, provenientes del interferómetro que se encuentra en nuestra facultad, se logre llegar a una estimación del diámetro angular del sol a la longitud de onda observada.

Para esto en primer lugar se realiza un breve marco teórico para contextualizar sobre radio-telescopios del tipo reflector parabólico y sobre interferometría, además de otros tópicos que se revisan en el desarrollo del trabajo. Luego se sigue con una sección donde se presentan los datos y gráficos obtenidos del desarrollo paso a paso de la tarea.

En este se comienza por la división de los datos entre los de mañana y tarde, y luego se procede con una serie de filtros para así generar una muestra más pulcra, y para finalizar el manejo de las mediciones, se grafican en función de la línea de base y de este resultado se grafica el valor absoluto.

Luego se ajusta una curva donde se modela, con el centro del sol como origen, y así se llega a una función de visibilidad, de donde se desprende el diámetro angular del sol.

A continuación se procede a hacer un análisis de los resultados obtenidos, donde se responden las preguntas planteadas en el enunciado de la tarea y finalmente se llega a la sección de conclusiones, donde se comentan las dificultades asociadas a la tarea y sobre el cumplimiento de objetivos de la tarea.

2. Marco teórico

Nuestra facultad cuenta con un interferómetro diseñado para hacer experiencias de laboratorio. Cuenta de dos antenas de 2.3m de diámetro separadas a 37.85 (+/- 0.1) metros en la dirección Este-Oeste 85.2 (+/- 0.3) grados respecto al norte geográfico. Estas antenas permiten seguir fuentes en el cielo por varias horas para obtener franjas interferométricas con distintas líneas de base. Los espectros medidos corresponden a mediciones hechas en una longitud de onda de 21.1 cm de la señal combinada de ambas antenas.

Sobre las antenas, es importante mencionar que estas corresponden a radio-telescopios de plato único, o sea corresponden a antenas reflectoras o antenas parabólicas que son de los radio telescopios más típicos. De las principales características de estos telescopios, se encuentra el *Half power Beam With*. Esto es el ancho angular del haz principal del patrón de radiación de la antena (HPBW), que se define como el ancho angular total entre los dos puntos que están 3dB abajo del pico del haz principal. Para los radio-telescopios de plato único con iluminación no uniforme se puede aproximar como:

$$\theta_{HPBW} = 1.2 \cdot \frac{\lambda}{D} \quad (1)$$

Donde D es el diámetro del plato.

Considerando la geometría de un interferómetro de dos antenas como se muestra en la figura 1, la apertura corresponde a la distancia perpendicular entre los ejes focales de las antenas, es decir, $D \cos(\theta)$ con D la línea de base y θ la altitud de la fuente astronómica.

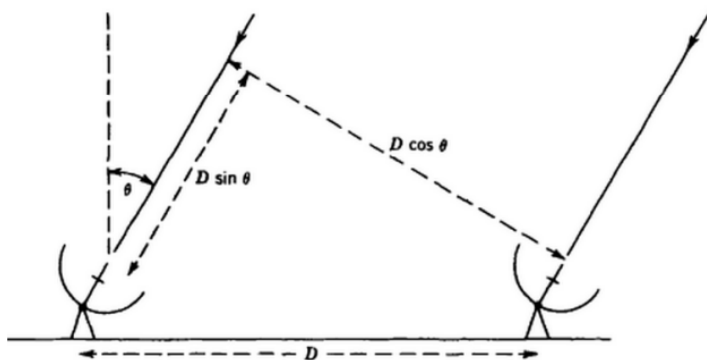


Figura 1: Interferómetro de dos elementos.

Para un modelo tridimensional en donde la posición de la fuente se mide en coordenadas de azimuth (Az) y elevación (El), la relación entre la apertura y las coordenadas es la que se muestra en la ecuación (2).

La posición azimutal es medida respecto de la línea de base de las antenas. Debido a que los radiotelescopios utilizan la dirección norte para medir esta posición, es necesario incluir en la ecuación un factor de corrección α , correspondiente a la diferencia angular entre ambas direcciones (0.3 grados). Esta relación es necesaria para graficar los datos de potencia promedio en función de la apertura.

$$B_s = D \cdot \sqrt{1 - \cos(Az - \alpha)^2 \cdot \cos(El)^2} \quad (2)$$

Luego al escribir los datos en función de su línea de base se puede sacar el valor absoluto de esta función, y su envolvente nos entrega una aproximación cercana de una parte del plano uv .

En principio hacer una imagen es una simple transformada de Fourier:

$$I'(x, y) = A(x, y) \cdot I(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \infty(u, v, 0) \cdot e^{-i2\pi \cdot (ux+vy)} \cdot du \cdot dv \quad (3)$$

En la práctica (como ocurre en esta experiencia) solo se obtienen visibilidades axiales, osea, como se menciona anteriormente, solo se obtiene una parte del plano uv .

La idea central de esta experiencia es ajustar la curva de visibilidad a los resultados obtenidos, variando el tamaño angular de la fuente. De esta manera se determina el diámetro angular del sol para la frecuencia del hidrógeno.

3. Resultados y Análisis

En primer lugar se pide obtener un promedio de los canales espectrales. Esto se muestra a continuación en la figura 2.

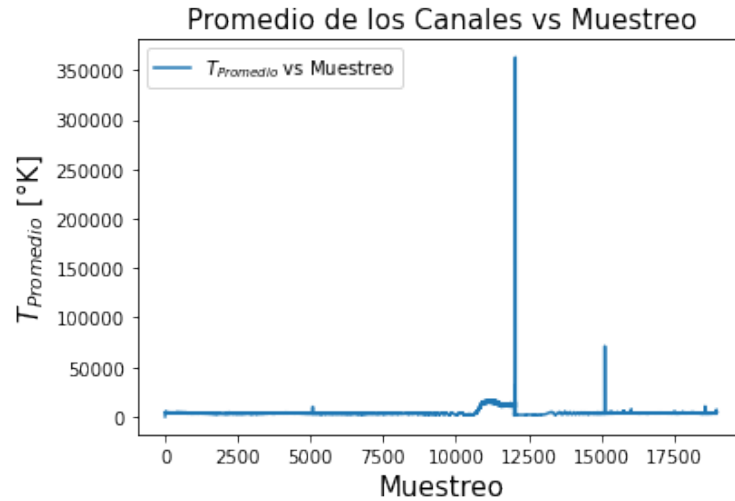


Figura 2: Promedio de los canales espectrales.

Lo que se muestra entonces es una medición de temperaturas de manera continua en la banda de muestras tomadas.

Enseguida se procede a generar un gráfico con las observaciones de ambos días como el que se muestra en el enunciado de la tarea. Se presenta este resultado en la figura 3.

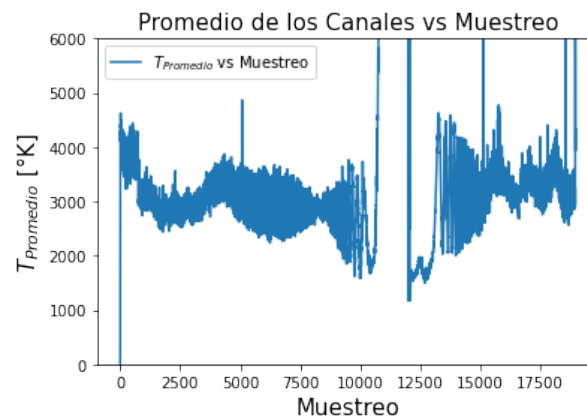


Figura 3: Datos no separados.

Se nos pide entonces separar estos datos entre los tomados durante la tarde y los que fueron recibidos al amanecer. Estos se muestran a continuación, donde en la figura 4 se puede apreciar el registro hecho por el interferómetro durante el amanecer y a su derecha se muestra un gráfico con

las mediciones hechas al atardecer.

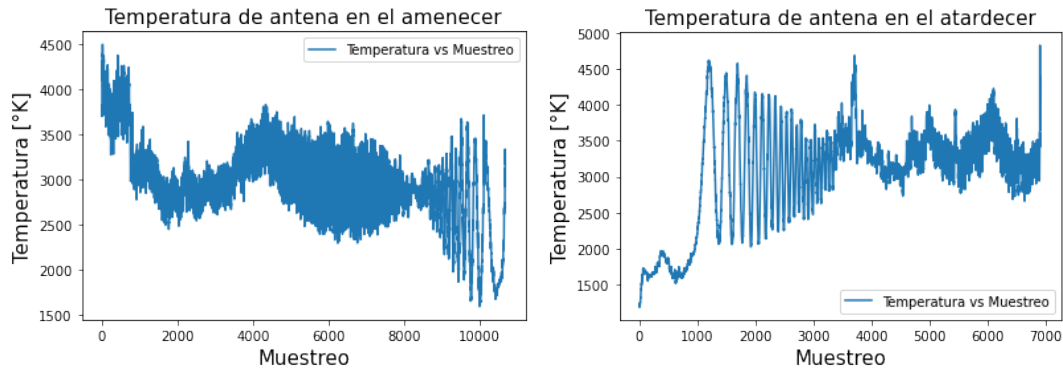


Figura 4: Datos separados del correspondientes al amanecer y al atardecer respectivamente.

A partir de los resultados anteriores se pide filtrar los datos bajo un criterio que se dé, manteniendo los datos útiles.

Para lograr esto se procede a quitar los datos asociados a elevaciones menores a 20° , esto ya que bajo esta barrera se concentra la mayor cantidad de ruido atmosférico. Este efecto del ruido se puede apreciar en la figura 5 donde se muestra un mapa de potencia logarítmico para una de las antenas que compone el interferómetro [1].

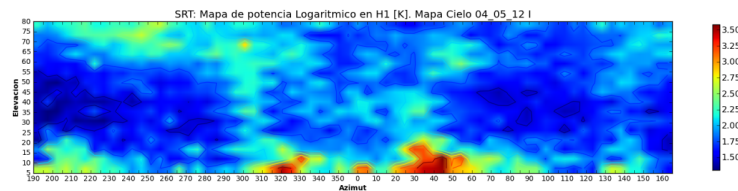


Figura 5: Mapa potencia logarítmico antena poniente [[1]].

Entonces filtrando se llega a los siguientes gráficos para las mediciones (figura 6).

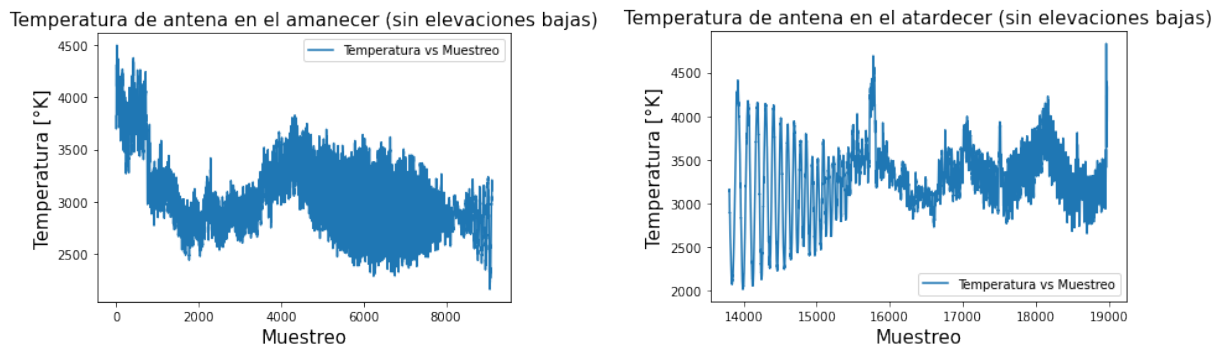


Figura 6: Temperatura medida por el interferómetro al amanecer y atardecer, respectivamente, con los datos obtenidos a baja elevación filtrados.

Además, para filtrar adecuadamente datos innecesarios o de tipo interferencias, se hizo uso de una función la cual a lo largo de toda el espectro de temperatura veía los máximos y mínimos locales y los iba reemplazando con el promedio entre los puntos de borde por cada corte.

Entonces, se aplica otro filtro a los datos obtenidos, donde en primer lugar se usa la transformada de Fourier de los datos obtenidos para poder eliminar los periodos largos y la componente DC del espectro, el resultado para los datos asociados al amanecer y atardecer se muestran en la figura 7.

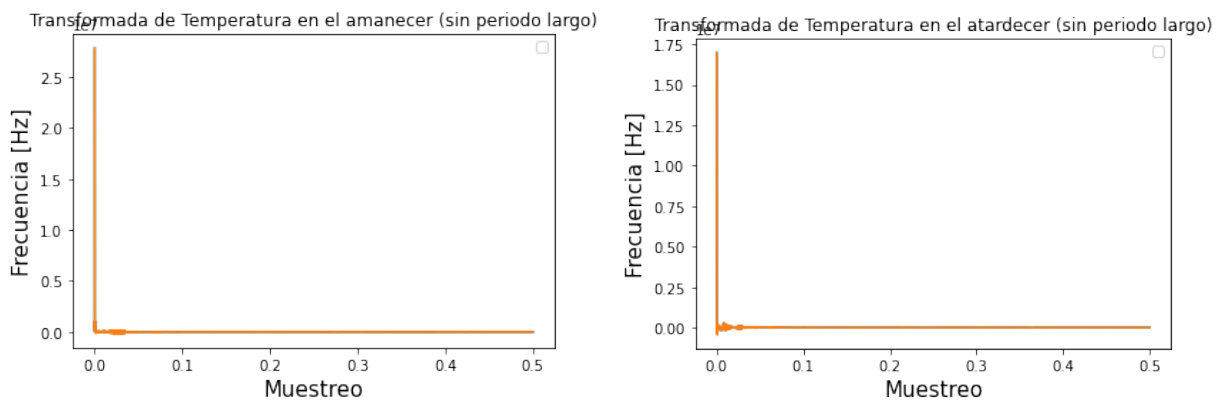


Figura 7: Transformada de Fourier de los datos sin los periodos largos y sin la componente DC para el amanecer y atardecer respectivamente.

Luego para una mejor visualización se procede a hacer una anti-transformada de Fourier, el resultado gráfico se muestra a continuación en la figura 8.

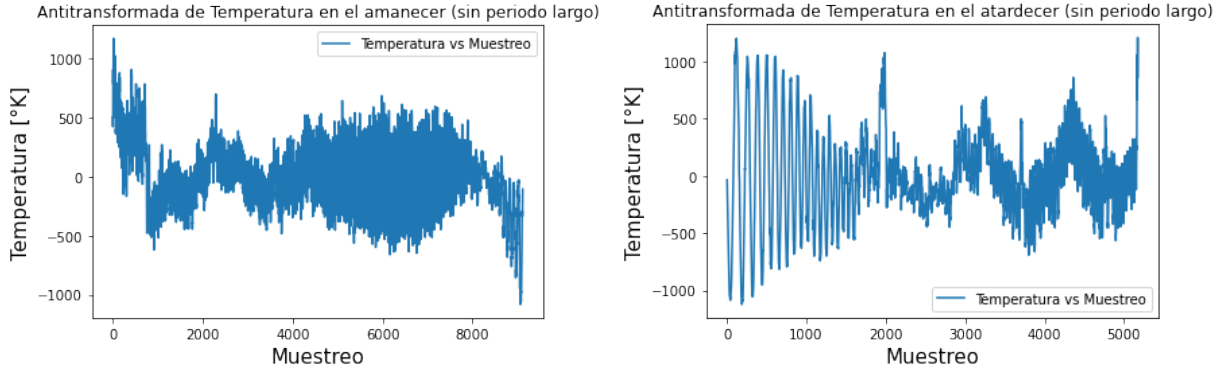


Figura 8: Anti-transformada de Fourier de los datos sin los periodos largos y sin la componente DC para el amanecer y atardecer respectivamente.

Una vez aplicados los filtros necesarios, se procede a escribir las mediciones en función de la línea de Base por esto se calcula este largo con la ecuación (2). Una vez identados los datos se grafica y se obtienen los gráficos que se muestran a continuación en la figura 9.

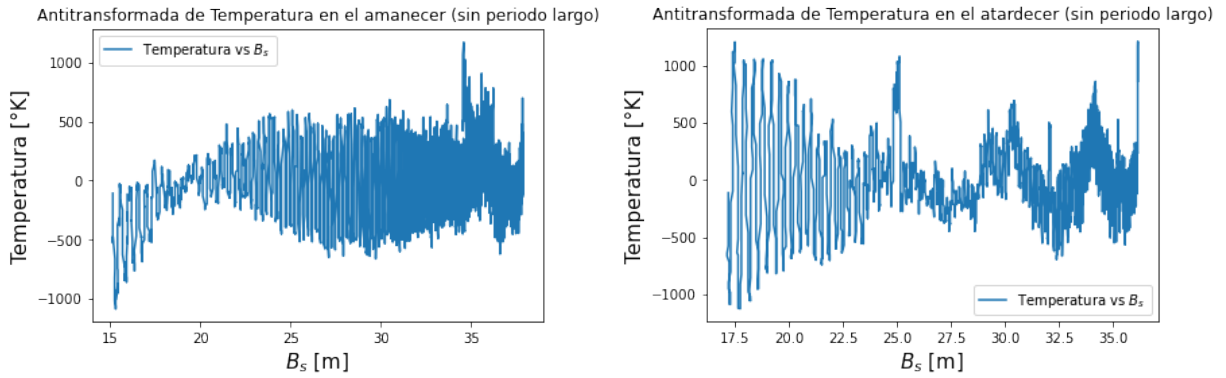


Figura 9: Anti-transformada de Fourier de los datos sin los periodos largos y sin la componente DC para el amanecer y atardecer, respectivamente, en función del largo en metros de la línea base.

Ahora bien, considerando un modelo del sol de disco plano, con intensidad uniforme sobre el disco, la función visibilidad se puede calcular según la siguiente integral:

$$V(B_S) = \int_{\Omega} I(\theta) F(\theta) d\theta \quad (4)$$

, donde $V(B_S)$ es la función de visibilidad para una línea de base dada (o base-line), θ es el ángulo en el cielo, con origen centrado en donde apunta el telescopio, Ω es el ángulo sólido del telescopio, $I(\theta)$ es la intensidad de brillo de la fuente (en este caso del sol). Por lo tanto queda que, dado que la imagen del sol es como un disco y multiplicando por 4 debido a los cuatro cuadrantes de coordenadas cartesianas:

$$V(B_S) = \int_0^R \int_0^{\sqrt{R^2-x^2}} I_0 \cos\left(\frac{2\pi B_S x}{\lambda}\right) dx dy = \int_0^R \sqrt{R^2-x^2} \cos\left(\frac{2\pi B_S x}{\lambda}\right) dx = \frac{\lambda I_0 R}{B_S} J_1\left(\frac{2\pi R B_S}{\lambda}\right) \quad (5)$$

, donde λ es la longitud de onda a la cual se observa el sol, R es el radio angular del mismo y $J_1(x)$ es la función de Bessel de primer orden, definida como:

$$J_1(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k!(k+1)!} \left(\frac{x}{2}\right)^{2k+1} \quad (6)$$

i.e.:

$$V(B_S) = \frac{\lambda I_0 R}{B_S} J_1\left(\frac{2\pi R B_S}{\lambda}\right) \quad (7)$$

Si se pudiese trazar una función envolvente por la parte superior de ambos gráficos de la figura 9, ésta sería la función visibilidad, y además, debería tomar una forma semejante a la que se aprecia en la siguiente figura:

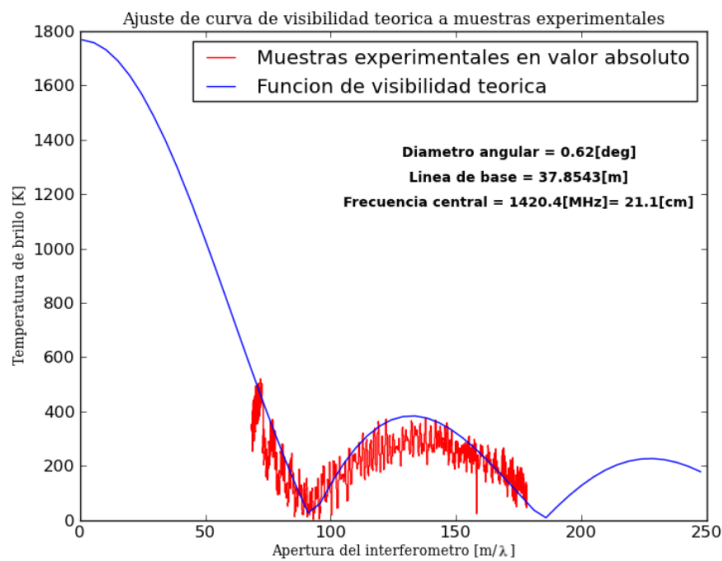


Figura 4.22: Ajuste de función de visibilidad V en función de la apertura del interferómetro. Los datos corresponden al valor absoluto de la potencia promedio.

Figura 10: Aquí se muestra algo que debería dar para el ajuste de la función visibilidad, como la envolvente por arriba del espectro de temperatura, donde en el eje x se muestra la apertura del interferómetro, que en el caso de este informe, es B_S [1]

En efecto, esto se ve corroborado en las siguientes imágenes:

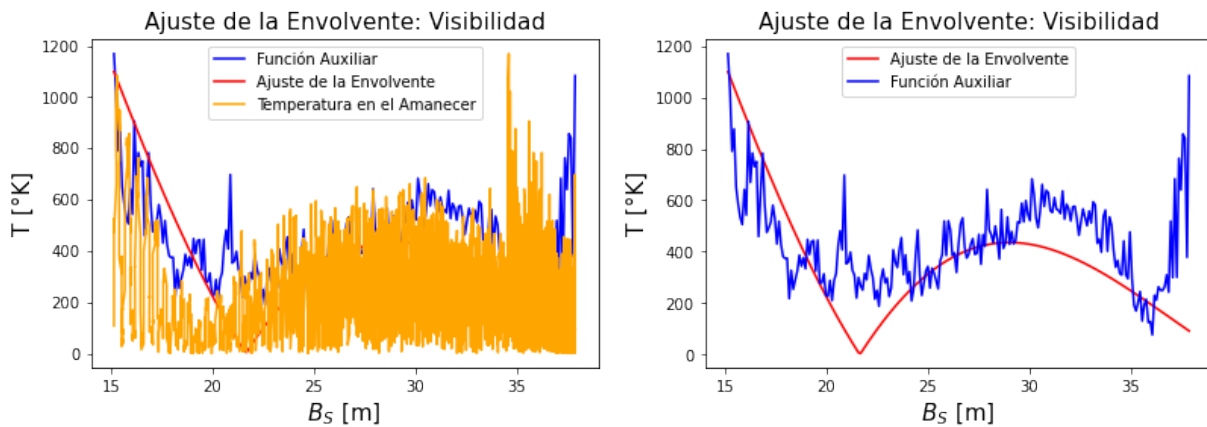


Figura 11: A la izquierda y a la derecha respectivamente, se muestra el ajuste de la visibilidad con los datos y sin ellos (para ver la función ajuste), para el amanecer. En el eje x e y respectivamente, la temperatura de la antena y la línea de base.

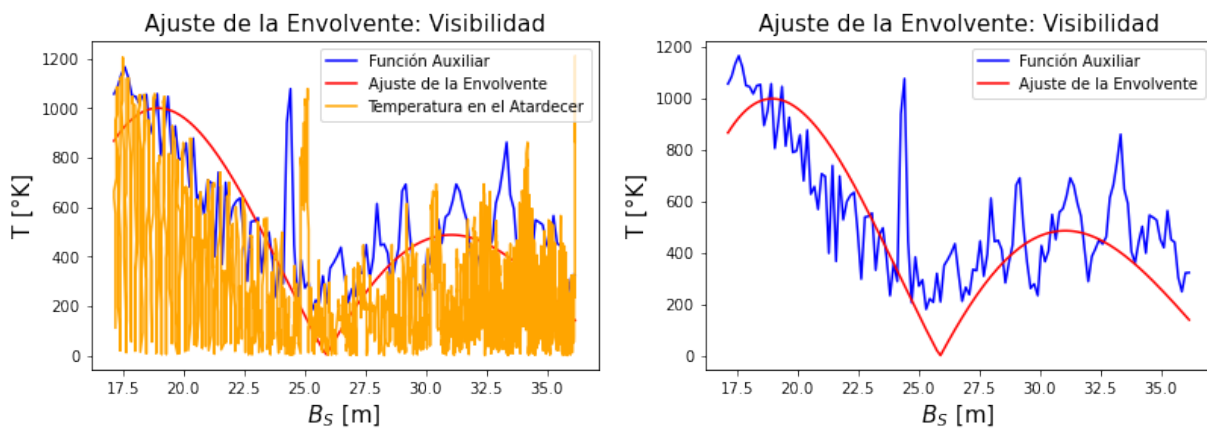


Figura 12: A la izquierda y a la derecha respectivamente, se muestra el ajuste de la visibilidad con los datos y sin ellos (para ver la función ajuste), para el atardecer. En el eje x e y respectivamente, la temperatura de la antena y la línea de base.

Donde se usó una función auxiliar para reemplazar la función envolvente que debería dar en *Python*, la cual no se pudo conseguir, por lo cual ésta auxiliar consistía en fijarse en los máximos locales de la función temperatura para ajustar aproximadamente la función visibilidad.

Algo notable del ajuste de la función visibilidad, es que existe un mínimo que se da en ambos casos aproximadamente a 20 y 25 metros de la línea de base. Por otro lado, es claro de ambos últimos gráficos que es útil y necesario la observación del sol por ambas antenas durante varias horas y a diferentes elevaciones, para que se pueda estimar correctamente la función visibilidad, y por tanto llegar a conocer el tamaño angular del sol.

4. Discusión

De la memoria de Pablo Tapia [1] se aproxima el diámetro del sol a 21 cm, lo que corresponde a aproximadamente 0.6482° , mientras que el resultado obtenido después de todo el trabajo realizado es un diámetro angular de 0.682° y 1.044° respectivamente para el amanecer y al atardecer. Osea que se llega a una aproximación razonable para el diámetro angular del sol en el cielo, ya para el amanecer, ya para el atardecer. Sin embargo, fue necesario usar adivinanzas en el método numérico para poder llegar a valores más precisos del ajuste de la visibilidad (tanto para el Radio Angular del sol como para la intensidad de brillo del mismo I_0), quizá en parte por la forma de la función de Bessel, que es una sumatoria infinita que prescinde de mucha precisión, al ser un polinomio de orden infinito (según la ecuación (6)).

Ahora bien, haciendo uso de la ecuación (1), se calcula el θ_{HPBW} como:

$$\theta_{HPBW} = 1.2 \cdot \frac{21.1/100}{2.3}$$

$$\theta_{HPBW} = 0.11087 \text{ rad} = 6.30752^\circ$$

Así de estos cálculos se desprende que:

$$\frac{6.30752^\circ}{0.5729578^\circ} \sim 11$$

Entonces el diámetro angular del sol es alrededor de 11 veces más pequeño que el haz principal de cada antenna. Entonces, el sol se pudo observar con este interferómetro precisamente porque en la resolución angular ya no se toma en cuenta el radio de los telescopios particulares, sino que se toma en cuenta la línea de base, o bien su proyección sobre la dirección de cada telescopio, que evidentemente es mucho mayor al tamaño de las antenas, y por tanto la resolución es mayor. Esto se traduce en que con un interferómetro tan simple como éste se puede observar y detectar objetos (que en caso contrario serían puntuales) que son más pequeños.

Se cree que los principales errores están asociados a errores en las mediciones debido a las interferencias producidas por el entorno, recordemos que la facultad se encuentra en pleno centro, además de que en el mismo departamento hay gran cantidad de transferencia de datos, vía bandas de celular, las cuales son cercanas a la banda de observación, esto puede causar estragos en las mediciones, otra fuente de error puede que estén asociados a las medidas de los largos y diámetros de las líneas base y el diámetro de las antenas.

También puede que haya una importante fuente de error dentro de las filtraciones hechas para la señal recibida, tal vez era necesario filtrar las mediciones menores a 25° de altitud, para tener una muestra más pulcra. Otra fuente de error puede haber sido los filtros pasa banda aplicados para filtrar las frecuencias bajas y la componente DC, aunque este último es el menos probable.

Ya finalizando, se puede decir que la principal limitante del interferómetro de dos elementos está asociado a lo poco que estos pueden aportar al relleno del plano uv , esto es directamente relacionado con que son sólo dos elementos, separados por una distancia fija en la tierra, es verdad, lo que aporta mayor dimensionalidad a la linea base es la rotación de la tierra, lamentablemente esto no es suficiente, y para reproducir esta experiencia con mayor precisión se debiesen de realizar, más mediciones, esto mediante el aumento del tiempo de integración, o agregando más antenas, dándole más dimensionalidades a las lineas base.

5. Conclusiones

Entonces se finaliza el informe con los objetivos principales de la tarea obtenidos. Esto es: se logra llegar a una buena aproximación para el diámetro angular del sol.

Para llegar a esto se consigue implementar en el código un buen manejo de datos y de filtración de modo que se llega a un resultado cercano a lo esperado.

Sobre los errores asociados a la experiencia, estos, como se comentó en la sección de discusiones, han de deberse principalmente a interferencias asociadas a las mediciones. A pesar de esto el resultado obtenido es bastante cercano a lo encontrado en la literatura, dado que el manejo de los datos llevan a un resultado aceptable. Considerando esto, otras fuentes de errores considerable, son los errores de precisión en las mediciones de distancia por ejemplo en las líneas de base, en la distancia que separa las antenas, etc. Errores de precisión que escapan de nuestro alcance.

Sobre los resultados obtenidos, estos cumplen cabalmente con los objetivos de la tarea, y se lleva a cabo un excelente manejo de datos, donde se aplican filtros coherentes a las dificultades presentadas por los datos brutos, como lo son la alta interferencia a bajas altitudes de observación, además de los filtros de banda, donde se elimina la componente DC y junto a este componentes de baja frecuencia que no aportaban al desarrollo de la experiencia.

Referencias

- [1] P. Tapia, «Puesta en marcha de la etapa analógica de un interferómetro de dos antenas», 2013.