

UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

AUTOMATIZACIÓN DE UN RADIÓMETRO PARA MEDIR LA OPACIDAD ATMOSFÉRICA A 115 GHz

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

NICOLÁS ESTEBAN RAMOS OLIVER

PROFESOR GUÍA:
JORGE MAY HUMERES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
HÉCTOR MILER AGUSTO ALEGRÍA
LEONARDO JAIME BRONFMAN AGUILÓ

SANTIAGO DE CHILE
AGOSTO 2009

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA
POR: NICOLÁS ESTEBAN RAMOS OLIVER
FECHA: AGOSTO 2009
PROF. GUÍA: Sr. JORGE MAY HUMERES

AUTOMATIZACIÓN DE UN RADIÓMETRO PARA MEDIR LA OPACIDAD ATMOSFÉRICA A 115 GHZ

Desde 1983 la Universidad de Chile, en colaboración con la Universidad de Harvard, opera en el Observatorio Interamericano de Cerro Tololo – La Serena, Chile – un radiotelescopio a 115 [GHz]. Este receptor, conocido como 1,2m *Southern Millimeter-Wave Telescope* (SMWT), sirvió para efectuar múltiples investigaciones científicas, como por ejemplo, estudiar la distribución y propiedades físicas de las nubes moleculares en la Vía Láctea austral. En la actualidad, este radiotelescopio es parte importante del área de instrumentación astronómica, creada recientemente a través de una colaboración entre los departamentos de Ingeniería Eléctrica y Astronomía de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

En el año 2004, se decidió desmontar el receptor del radiotelescopio y trasladarlo al Observatorio Astronómico Nacional en Cerro Calán para efectuar algunas modificaciones, apuntando principalmente a la modernización y búsqueda de mayor eficiencia del mismo. Se destacan los siguientes avances ya ejecutados:

- Incorporación de un nuevo oscilador de tipo Gunn en reemplazo del oscilador local original de tipo Klystron, ampliando la banda de frecuencia en que se puede medir y haciendo más simple la operación del receptor.
- Incorporación de un amplificador HEMT en la primera etapa de recepción. Con esto se disminuye la temperatura de ruido del instrumento, aumentando su sensibilidad.
- Se discutió la inclusión de un método capaz de solucionar el problema de la banda imagen. Además, se propuso un cambio de HEMT dentro del termo, aprovechando el estudio anterior.

El objetivo principal de esta memoria consiste en utilizar este receptor, ya mejorado, como radiómetro para medir la opacidad atmosférica. Se busca determinar si las condiciones de observación a 115 [GHz] en Cerro Calán ameritan el traslado del radiotelescopio desde Cerro Tololo a este lugar. Básicamente la memoria considera las siguientes etapas:

- Diseño e implementación de la automatización del sistema de medición
- Realización de las mediciones en Cerro Calán
- Interpretación de las mediciones y determinación de la opacidad atmosférica

En el caso de la opacidad atmosférica, las expectativas que se tenían para la zona de Cerro Calán eran bajas, por no ser un lugar óptimo en términos de altura y humedad. Sin embargo, se registraron niveles de transmisión mayores a los esperados, permitiendo pronosticar futuras observaciones astronómicas exitosas.

En el ámbito computacional, se logró desarrollar un software de medición automático, capaz de calibrar el movimiento del espejo de medición, medir la temperatura de ruido, medir la opacidad del cielo en diferentes ángulos, calcular parámetros de interés y registrar los datos de forma ordenada.

Finalmente, cabe destacar que este proyecto tendrá un gran impacto no sólo en astronomía, sino también en el área de instrumentación astronómica, sumado lógicamente al aporte en la docencia que esto conlleva.

*A mi Papá, el ingeniero que gestó esto desde sus inicios
y que hoy, después de tanto camino recorrido,
me acompaña incansablemente en su término...*

*A mi Mamá, la enfermera que muchas veces curó mis heridas,
pero que muchas más veces, sanó mi espíritu...*

Agradecimientos

Mis primeros y más sentidos agradecimientos son sin duda dedicados a mi familia, partiendo por el núcleo principal. A mi admirable Papá, Mauricio (“Armonyl”). A mi imprescindible Mamá, Ana María (“Vieja”). A mis hermanos, el bárbaro Mauricio (“Morla”), el relajado Sebastián (“Sebi”), la valiente Valentina (“Cara de Perro”) y la tierna Isabel Margarita (“Cara de Burro”). Sin su ayuda esto no habría llegado ni a la mitad. Gracias por resistir mis constantes cánticos, compartir conmigo más de algún baile sin el más mínimo ritmo, y sobretodo, por mostrar un constante interés en lo que me pasa y en las cosas que hago.

Mención honrosa a mis cuatro abuelos, que fueron los que pusieron en marcha este buque insigne que tuve la suerte de tener por familia. Sé que Juan (“Dino”) habría estado orgulloso, y me consta que Gilberto (“Gilo”), María (“Mimi”) y mi inseparable “Abuela” Margarita lo están.

Especiales y muy cariñosos agradecimientos para mi amada Paola (“Payito”), quien ha sabido aguantarme y apoyarme en todas las circunstancias de la vida. Gracias por los excelentes momentos que hemos vivido y por quererme tal como soy.

En lo intelectual, no puedo dejar de agradecer a mi profesor guía, Don Jorge May, quien mostró una dedicada preocupación por el desarrollo de esta memoria. Gracias por su muy buen humor y por integrarme a este maravilloso grupo de trabajo. Agradezco también a Leonardo Bronfman por su valiosa ayuda, pero además por su gran simpatía y confianza en mi trabajo.

No puedo dejar fuera a Nicolás Reyes, quien se convirtió en una mezcla entre jefe, profesor y amigo. Muchas gracias por la continua ayuda y la buena voluntad, teniendo más de una vez que repetirme y recordarme cosas que ya habías dicho. Lo mismo para José Pizarro, quien con paciencia y gran generosidad me ayudó en momentos de urgencia, dejando siempre la puerta abierta para futuras colaboraciones. Así también agradezco a todos los integrantes del Laboratorio de Ondas Milimétricas: Ricardo, Pablo, Rafael, Franco, Patricio. Todos aportaron de distintas maneras a que esta memoria resultara.

A mis queridos amigos eléctricos, por los hermosos asados y partidos de fútbol. Todos me entregaron su compañía y apoyo en diferentes momentos de dificultad y también de alegría.

A mis amigos “de primer año” por la gran amistad que hemos cultivado y por hacer que la ingeniería sea lo último que nos une, sobreponiendo siempre lo que realmente es importante.

Finalmente, a mis amigos “del colegio”. Cada cual sabe qué tan importante es para mí. Gracias por el fútbol, las fiestas, la música, su ayuda, su cariño, por las interminables conversaciones intelectuales que hemos tenido y por mostrar persistente interés en mis actividades estudiantiles, entregándome siempre palabras de apoyo y admiración.

Índice de Contenidos

1. Introducción	1
1.1. Marco de Desarrollo de la Memoria.....	2
1.2. Motivación y Objetivos Generales	3
1.3. Objetivos Específicos	5
1.4. Hipótesis de Trabajo y Metodología	5
1.5. Estructura del Presente Trabajo	7
2. Marco Teórico	8
2.1. Radiación Electromagnética	8
2.2. Radiación de Cuerpo Negro.....	8
2.3. Radiación al Atravesar un Cuerpo Semitransparente	10
2.4. La Atmósfera	12
2.5. Detección de Señales Débiles en el Espacio.....	14
2.6. El Receptor Superheterodino	15
2.6.1.- Componentes Principales del SWMT.....	17
2.6.2.- Ruido Generado y sus Inconvenientes	18
3. Trabajo Realizado.....	22
3.1. Mediciones de Opacidad Atmosférica.....	22
3.1.1.- Descripción General.....	22
3.1.1.- Metodología de Medición y Calibraciones	24
3.2. Limitación de Rango del Motor.....	28
3.2.1.- Implementación y sus Inconvenientes.....	29
3.3. Trabajo Computacional.....	32
3.3.1. Planilla Excel.....	32
3.3.2. Software de Medición Desarrollado en LabView.....	33
4. Resultados Obtenidos.....	40
4.1. Mediciones de Opacidad Atmosférica.....	40

4.1.1. Mediciones Extraordinarias	47
5. Conclusiones.....	59
5.1. Trabajo Futuro.....	60
Referencias	62
A. Modelo para Estimar el Ruido.....	64
B. Modelo para Análisis de Datos.....	65
C. Programación y Conexión del Motor.....	70
D. Procedimiento de Encendido y Medición con el Receptor	71
E. Archivo de Salida Software de Medición de Opacidad Atmosférica.....	74
F. Hoja de Datos del <i>Limit Switch</i>.....	77
G. Calibración Ángulo de Espejo - Paso de Motor	80
H. Códigos de MatLab Implementados en LabView	81

Índice de Figuras

Figura 1.1: El espectro electromagnético	2
Figura 1.2: (a) Radiotelescopio en su ubicación original (Cerro Tololo).(b) Receptor en el Laboratorio de Ondas Milimétricas	4
Figura 2.1: Radiación de cuerpo negro. (a) Se resalta la aproximación de Rayleigh – Jean. (b) Se muestra el espectro de Planck para cuerpos negros de diferente temperatura	9
Figura 2.2: Capas atmosféricas y su temperatura	12
Figura 2.3: Descripción de las capas de la atmósfera	13
Figura 2.4: Transmisión atmosférica para diferentes longitudes de onda. Medición a 2.400 metros de altura. Temperatura de 10 ^o C	14
Figura 2.5: Proceso heterodino para obtener la frecuencia intermedia	16
Figura 2.6: Diagrama esquemático de un receptor superheterodino	17
Figura 2.7: Esquema de diseño del SMWT	18
Figura 2.8: Fuentes naturales y artificiales de ruido [8].....	20
Figura 2.9: Atenuación atmosférica promedio en función de la frecuencia.....	21
Figura 3.1: Esquema del módulo de medición.....	23
Figura 3.2: Imagen rotulada del circuito externo.....	24
Figura 3.3: Medición de 6 horas (Laboratorio).....	26
Figura 3.4: Medición de 3 horas (Intemperie)	26
Figura 3.5: Tendencia de resultados esperada para las mediciones de opacidad atmosférica.....	27
Figura 3.6: Sensor HOA1180. (a) Diagrama esquemático de los dos tipos de sensores disponibles. (b) Apariencia física del sensor.....	29
Figura 3.7: Esquemático de conexión entre sensores HOA1180 y circuito externo.....	30
Figura 3.8: Esquema de interacción entre el sensor HOA1180 y la pieza metálica de reflexión.....	30
Figura 3.9: Implementación de sensores HOA1180.....	31
Figura 3.10: Programa de medición inicial desarrollado antes del presente estudio.....	34
Figura 3.11: Diagrama de bloques de LabView de subprograma de calibración	36
Figura 3.12: Diagrama de bloques de LabView mostrando una instancia de MatLab	37
Figura 3.13: Diagrama de bloques software automático de medición	38

Figura 4.1: Resultados gráficos de un procedimiento de medición.....	47
Figura 4.2: Medición extraordinaria 1: opacidad atmosférica por la tarde.....	48
Figura 4.3: Medición extraordinaria 2 (fragmento): opacidad atmosférica medida continuamente entre las 11:00 y 14:00 horas	49
Figura 4.4: Medición extraordinaria 3: opacidad atmosférica medida continuamente entre las 15:30 y 16:10 horas.....	50
Figura 4.5: Interfaz principal del software de medición automático	52
Figura 4.6: Botón para calibrar	52
Figura 4.7: Interfaz secundaria de calibración	52
Figura 4.8: Botón H - C Test y resultado de la prueba en interfaz principal.....	53
Figura 4.9: Mensaje para ubicar nitrógeno	53
Figura 4.10: Interfaz secundaria de test para medir temperatura de ruido	53
Figura 4.11: Botón Medir.....	54
Figura 4.12: Botón Generar Archivo	54
Figura 4.13: Señal de alerta	54
Figura 4.14: Antena de alerta.....	54
Figura 4.15: Alerta escrita en indicador. (a) Mientras el receptor mide. (b) Mientras el motor se mueve	54
Figura 4.16: Pantalla gráfica.....	55
Figura 4.17: Indicadores y controladores.....	55
Figura 4.18: Indicador de tiempo.....	55
Figura 4.19: Mediciones realizadas	56
Figura 4.20: Indicadores de resultados	56
Figura 4.21: Diálogo Estado del Cielo.....	56
Figura 4.22: Diálogo Comentarios	56
Figura 4.23: Diálogo para nombrar archivo de salida	57
Figura 4.24: Pantalla desplegada una vez finalizado el procedimiento de medición.....	57
Figura B.1: Modelo simplificado de la atmósfera	65
Figura C.1: Conexión del motor a circuito externo	70

Índice de Gráficos

Gráfico 4.1: Frecuencia acumulativa de mediciones según una cota superior para τ	44
Gráfico 4.2: Resumen mensual de mediciones con $\tau \leq 0,31$	45
Gráfico 4.3: τ promedio mensual.....	46

Capítulo 1

Introducción

La astronomía es una de las ciencias más antiguas que existen. Remontándose incluso a las primeras civilizaciones humanas de las que se tiene conocimiento. Esta disciplina, estuvo intrínsecamente ligada a la observación del cielo, limitándose a lo que el ser humano era capaz de ver. Así pues, en 1931 Karl Jansky, un ingeniero en telecomunicaciones, descubrió una extraña fuente de ruido que interfería las comunicaciones de radio. La procedencia de estas señales fue controvertida, ya que se postuló que eran emitidas desde el espacio. Ahondando más aun, y sólo tras años de estudio y discusiones, se llegó a la conclusión de que este ruido correspondía a ondas venidas desde el centro de nuestra galaxia.

Dada la motivación por conocer más y profundizar los estudios antes mencionados, existió un gran auge en lo que a instrumentación astronómica se refiere. Se separó así la astronomía clásica (óptica) de la radioastronomía. Esta última utiliza la información obtenida desde diferentes bandas de frecuencia, siendo en específico las ondas de radio (RF) las de principal relevancia e interés. Mayor comprensión de las diferentes bandas se logra al estudiar el espectro electromagnético, adjunto en la figura 1.1. Allí se puede apreciar el gran abanico de posibilidades que abre la radioastronomía, considerando que el rango visible es muy acotado, observando el espectro global.

La banda milimétrica corresponde a la de mayor interés para este estudio. Dicho intervalo corresponde a las frecuencias comprendidas entre 30 y 300 [GHz]. Esta banda se utiliza para el estudio de nubes moleculares, el centro galáctico y las galaxias que presentan alto nivel de corrimiento al rojo¹, entre otras fuentes. Para las longitudes de onda asociadas a este rango de frecuencias (1 – 10 [mm]), las fuentes astrofísicas recién nombradas son más transparentes que en el campo óptico e infrarrojo, permitiendo el estudio de regiones más densas. Sin embargo, aun cuando existe dicha transparencia, se

¹ En inglés se conoce como *redshift*; ocurre cuando la radiación electromagnética (E.M.) emitida o reflejada por un objeto es desplazada hacia el extremo rojo (de menor energía) del espectro electromagnético, producto del Efecto Doppler. Más genérico, el corrimiento al rojo se define como un incremento en la longitud de onda de la radiación E.M. que llega a un receptor, comparada con la longitud de onda emitida por la fuente.

tiene que la atmósfera es muy opaca en estas longitudes de onda, lo cual conlleva algunas dificultades que se deben solucionar y estudiar en detalle.

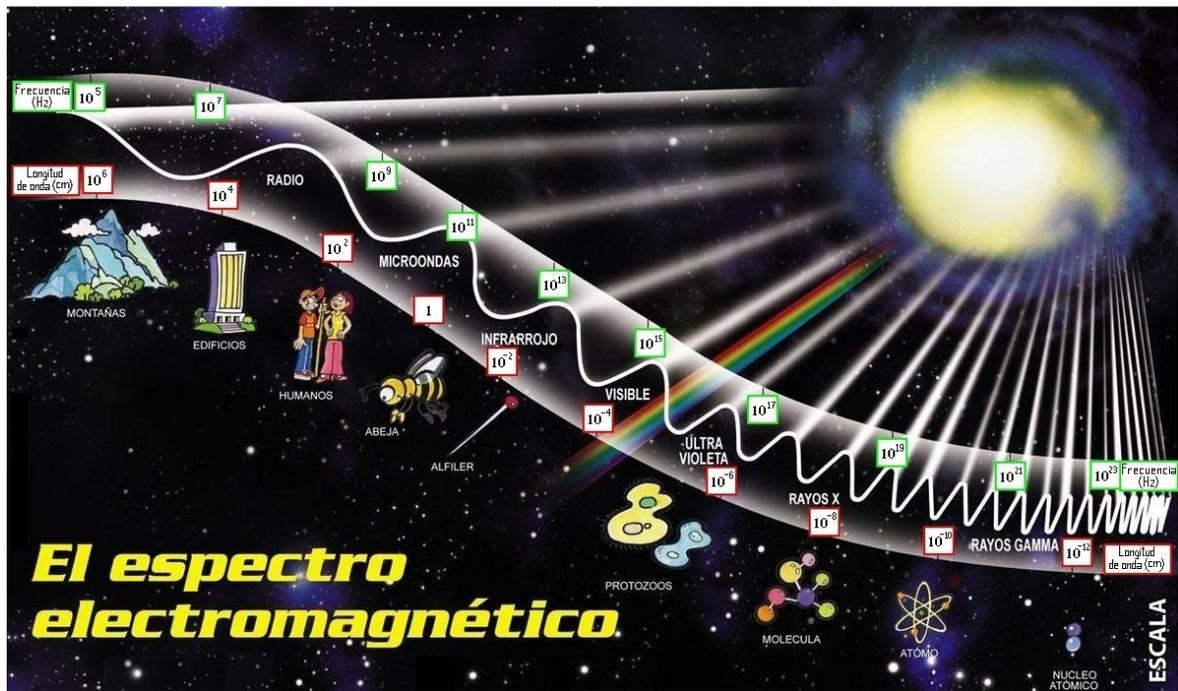


Figura 1.1: El espectro electromagnético.

1.1. Marco de Desarrollo de la Memoria

El presente trabajo para optar al Título de Ingeniero Civil Electricista, se inició en septiembre del año 2008, y fue desarrollado en el Laboratorio de Ondas Milimétricas ubicado en el Observatorio Astronómico Nacional, en Cerro Calán. Allí opera el Departamento de Astronomía de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Al finalizar se han recopilado diversos datos que serán de utilidad para analizar la viabilidad de diferentes proyectos de radioastronomía.

El tema de esta memoria es de suma relevancia para Chile, dadas las privilegiadas condiciones que presenta el norte de nuestro país, y más en particular la Segunda Región, que califica como uno de los mejores sitios para la observación astronómica a nivel mundial. Se destaca el proyecto ALMA (*Atacama Large Millimeter Array*), el cual contempla la instalación de alrededor de 64 antenas de 12 metros de diámetro de alta precisión, en el llano de Chajnantor, cerca de San Pedro de Atacama a 5.000 metros sobre el nivel del mar. En el caso de Cerro Calán, aun cuando las condiciones no son muy favorables debido principalmente a su baja altura (850 metros), en comparación con otros lugares en

que se desarrolla la radioastronomía como Cerro Tololo (2.200 metros), es de suma importancia contar con herramientas que ayuden a la docencia. En este ámbito, resulta crucial la formación de ingenieros y astrónomos capaces de aprovechar la oportunidad de trabajar en ALMA y los otros centros de radioastronomía que existen en el país, utilizando tecnología de punta e insertos en la cúspide de la ciencia mundial.

1.2. Motivación y Objetivos Generales

Desde 1983 la Universidad de Chile, en colaboración con la Universidad de Harvard, opera en el Observatorio Interamericano de Cerro Tololo – La Serena, Chile – un radiotelescopio a 115 [GHz]² para estudiar la distribución y propiedades físicas de las nubes moleculares en la Vía Láctea austral. En la actualidad, este radiotelescopio es parte importante del área de instrumentación astronómica, creada recientemente a través de una colaboración entre los departamentos de Ingeniería Eléctrica y Astronomía de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

Los orígenes del receptor 1,2[m] *Southern Millimeter-Wave Telescope* (SMWT)³, como es conocido este instrumento, se remontan a 1983. Construido en la Universidad de Columbia, fue concebido con el objetivo fundamental de observar transiciones rotacionales del monóxido de carbono ^{12}CO y ^{13}CO , las cuales emiten fotones de frecuencia 115,271 [GHz] y 110,201 [GHz] respectivamente. El radiotelescopio tiene una antena parabólica de 1,2 [m] de diámetro, consistente en una pieza única de aluminio, con una exactitud superficial de 26 [μm], lográndose así una resolución angular que sólo es limitada por difracción.

Instalado desde sus inicios en el Observatorio de Cerro Tololo (figura 1.2.a), este equipo sirvió para la realización de múltiples investigaciones científicas y publicaciones asociadas [1] y [2]. Destaca, en este sentido, la confección del primer mapa de la vía Láctea, midiendo emisión de ^{12}CO . En el año 2004, se tomó la determinación de desmontar el receptor del radiotelescopio para ejecutar algunas modificaciones, apuntando principalmente a la modernización y búsqueda de mayor eficiencia del mismo. Con este fin, se trasladó el receptor al Observatorio Astronómico Nacional en Cerro Calán, en cuyo Laboratorio de Ondas Milimétricas se han realizado los trabajos tendientes a su modernización

² Valor inserto en lo que se conoce como banda milimétrica, es decir que la longitud de onda λ , es del orden de los milímetros.

³ En algunas publicaciones se referencia este receptor como Columbia-Universidad de Chile, o bien Southern Mini.

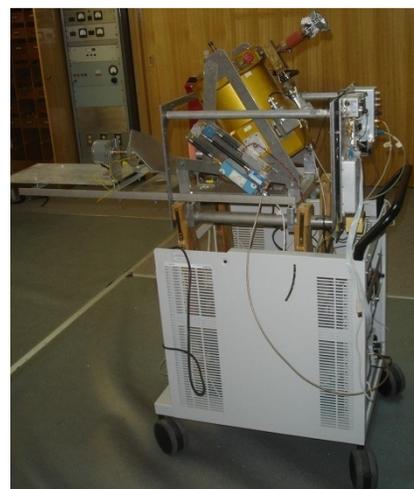
(figura 1.2.b). Sobresalen en este sentido las siguientes variaciones efectuadas, por diferentes alumnos memoristas de Ingeniería Civil Eléctrica:

- [3] Walter Max-Moerbeck, 2005: Incorporación de un nuevo oscilador de tipo Gunn en reemplazo del oscilador local original del tipo Klystron. Con esto, la cantidad de ruido que se inyecta al mezclador es menor, la operación es más sencilla y el rango de frecuencias que se pueden generar es más amplio.
- [4] Nicolás Reyes, 2006: Incorporación de un amplificador HEMT en la primera etapa de recepción. Con esto, se disminuye la temperatura de ruido del instrumento, aumentando su sensibilidad.
- [5] Cristián Vázquez, 2007: Se discutió la inclusión de un método capaz de solucionar el problema de la banda imagen, recomendando un supresor de banda lateral o SSB fuera del termo. Además, se propuso un cambio de HEMT dentro del termo, basado en la buena experiencia de Nicolás Reyes [4].

La actualización tecnológica del receptor resulta de gran relevancia ya que permitirá generar nuevamente datos de interés científico. Adicionalmente, la mayor motivación de este estudio radica en utilizar este receptor ya mejorado, como radiómetro para medir la opacidad atmosférica. Se pretende así determinar si las condiciones de observación a 115 [GHz] en Cerro Calán ameritan considerar el traslado del radiotelescopio en su totalidad a dicho lugar. Este proyecto tendrá un gran impacto no sólo en astronomía sino también en el área de instrumentación astronómica, sumado lógicamente al aporte en la docencia que esto conlleva.



(a)



(b)

Figura 1.2: (a) Radiotelescopio en su ubicación original (Cerro Tololo). (b) Receptor en el Laboratorio de Ondas Milimétricas.

1.3. Objetivos Específicos

Tomando en cuenta que esta memoria contempla tanto la automatización como el estudio de la opacidad atmosférica, los objetivos específicos del trabajo son los siguientes:

- Lograr que el receptor, conectado a un computador, tome medidas del cielo desde 0° a 90°, usando como referencia el cénit en el lugar de operación. Se busca además procesar las mediciones de manera automática, recibiendo como entrada la configuración de algunos parámetros de interés.
- Hacer mediciones de opacidad atmosférica en el Cerro Calán, en un ciclo idealmente anual. Con esto se espera entregar antecedentes y datos relevantes, que ayuden a decidir acerca de la conveniencia y factibilidad operativa del traslado del SMWT en su totalidad a Cerro Calán.

1.4. Hipótesis de Trabajo y Metodología

La metodología que se utiliza en este trabajo de título tiene diversas aristas, entre las cuales se encuentran la revisión bibliográfica, los criterios computacionales para ordenar y manejar las distintas variables, la optimización operativa, las mediciones de opacidad atmosférica, etc. En esta sección se presenta una descripción global de estas etapas del proyecto.

La revisión bibliográfica y recopilación de información asociada, corresponde a un pilar fundamental en el trabajo realizado. Esto debido principalmente a la necesidad de conocer el estado del arte, los avances que se van dando de manera continua en el ámbito de la radioastronomía y los estudios relacionados. Para esta memoria en particular resulta interesante conocer los diferentes modelos que se utilizan para el análisis y procesamiento de datos. En este caso se ocupa un modelo de linealización de orden cero (anexo B), siendo importante revisar el eventual uso de modelos más exactos en trabajos futuros.

En lo que al área computacional se refiere, se hará uso tres software principales. El primero es MatLab (Versión 7.6, 2008), utilizado para el manejo matemático de datos, procesamiento numérico y aplicación de modelos y fórmulas. El segundo programa corresponde a Agilent I/O (Versión 15, 2007)

para la comunicación efectiva entre instrumentos y el computador. Finalmente, mediante LabView (Versión 8.2, 2006) se diseñan instrumentos virtuales y programación visual – diagramas de bloques en vez de códigos – con lo cual se puede crear interfaces que engloban las funcionalidades de los otros software mencionados. En otras palabras, desde LabView, se utilizan instancias de compatibilidad con MatLab y Agilent I/O, de forma tal que todo queda en un programa único desarrollado para la automatización de las mediciones con el receptor. De esta manera, se busca implementar un mecanismo que sea capaz de controlar en su totalidad el accionar del equipo, además de tener una comunicación adecuada con los instrumentos de medición asociados. Como ya se ha esbozado, la idea es además que el programa permita un procesamiento y despliegue de datos de una manera cómoda y comprensible.

Ahora bien, en el ámbito de las mediciones, es preciso definir el proceso y los puntos de interés principales. El procedimiento consiste en la obtención de datos en diversos ángulos del cielo mediante un espejo que hace rebotar las ondas provenientes del espacio, de forma tal que ingresen a un *horn* o bocina cónica. Después de varios procesos electrónicos en el receptor, se obtienen los datos desde un medidor de potencia (Agilent 53150A), conectado al computador mediante una tarjeta GPIB – del inglés *General Purpose Instrumentation Bus* – que llega a este último con formato USB. Estas medidas del cielo se intercalan con mediciones de una carga caliente de calibración, para evitar los efectos negativos de la deriva⁴ de los equipos de medición, en este caso particular, del medidor de potencia. Se mide también nitrógeno líquido al comenzar y terminar el experimento para conocer la temperatura de ruido del sistema, tema que se explica en el anexo A. Por su parte, en el anexo B, además del modelo de procesamiento de datos, se exhibe un diagrama explicativo relacionado a la asignación de ángulos.

Por otro lado, la posición del espejo es controlada con un motor paso a paso, el cual a su vez está conectado a un circuito electrónico programado para dar movimiento al motor. Dicho circuito es manejado desde el computador, con el cual se comunica mediante un cable adaptador entre puerto serial y USB. El tema de las mediciones y su metodología se retoma en la sección 3.1.

⁴ A medida que pasa el tiempo, el medidor de potencia va midiendo valores progresivamente distintos, lo cual dice relación con la estabilización del dispositivo. Es decir, este tipo de instrumentos debe encenderse un largo lapso antes de medir si se desea evitar esta derivación. Lo cual en la práctica resulta complejo cuando las mediciones no son tan extensas y continuadas.

1.5. Estructura del Presente Trabajo

Este trabajo consta de 5 capítulos, incluyendo el que corresponde a la introducción. Se procede entonces a explicar, a grandes rasgos, el contenido y la relevancia de cada capítulo, con la intención de entregar un resumen ordenado y lógico del trabajo desarrollado.

En el capítulo 2 se lleva a cabo la revisión bibliográfica relativa al tema de este estudio. Los tópicos principales tratados en este compendio son: la naturaleza y detección de las señales provenientes del espacio; una descripción de la composición de la atmósfera y las características esenciales de cada capa; y, la teoría detrás de los receptores superheterodinos y las consiguientes interferencias que presenta el medio.

En el capítulo 3 se explica el trabajo realizado durante este trabajo de título. La división de este apartado consiste en: las labores relacionadas a las mediciones de opacidad atmosférica; la implementación y evaluación de dispositivos al sistema; y, el desarrollo computacional de un software automático de medición.

En el capítulo 4, se exponen los resultados obtenidos en esta memoria. Como ocurre a lo largo de todo el estudio, existe dos grandes materias a las cuales referirse: medición de opacidad atmosférica, con los valores y gráficos obtenidos; y, el programa computacional, examinando el cumplimiento de los requerimientos iniciales.

En el capítulo 5, se construyen algunas conclusiones y se discuten los resultados del trabajo, así como también sus ventajas, proyecciones y el contexto en el cual se enmarcó. Además se propone el trabajo futuro que debiese ejecutarse para complementar y mejorar el producto obtenido con esta tesis.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Radiación Electromagnética

Según la teoría cuántica, los átomos y moléculas poseen ciertos niveles definidos, discretos, de energía. En virtud de lo anterior, un compuesto es capaz de absorber y/o emitir fotones solamente con una energía cuantizada, dada por la diferencia de energía entre dos estados permitidos. La energía de un fotón se relaciona con la frecuencia de éste por medio de la expresión

$$E = \hbar \cdot \nu \quad (2.1)$$

donde $\hbar = 2\pi h$, con h la constante de Planck y ν la frecuencia asociada al fotón. Se dice que en esa frecuencia se produce una línea espectral del compuesto en estudio. En la banda de las microondas se realizan observaciones de líneas espectrales de distintas moléculas. En general se trata de transiciones rotacionales, pues las transiciones de otro tipo tienen mayor o menor energía y por tanto se producen en otras bandas. Son de particular importancia las líneas del H_2 , pues este es el elemento más abundante del universo. Lamentablemente, las líneas espectrales de este elemento no son fáciles de observar: la molécula de H_2 es simétrica y no posee momento dipolar eléctrico, el cual tiene directa relación con la probabilidad de ocurrencia de las transiciones, las cuales además de ser muy escasas, pueden darse en zonas del espectro donde no existen ventanas de observación. Afortunadamente, se pueden utilizar las líneas espectrales del CO – una de ellas ubicada a 115 [GHz], lo que permite medirla con el receptor en estudio – pues este compuesto es un trazador del H_2 . Es decir, ambos se encuentran combinados en una proporción conocida.

2.2. Radiación de Cuerpo Negro

Un cuerpo negro es un objeto teórico o ideal que absorbe toda la luz y toda la energía radiante que incide sobre él. Nada de la radiación incidente se refleja o pasa a través del cuerpo negro. A pesar de su nombre, el cuerpo negro emite luz y constituye un modelo ideal físico para el estudio de la emisión de

radiación electromagnética. El nombre cuerpo negro fue introducido por Gustav Kirchhoff en 1862. La luz emitida por un cuerpo negro se denomina radiación de cuerpo negro, la cual en el caso de existir equilibrio termal, viene dada por la función de Planck, que se explicita a continuación

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (2.2)$$

en la cual k representa la constante de Boltzman, c la velocidad de la luz y T la temperatura. Para el caso de radiometría de microondas, se puede aplicar el límite de Rayleigh – Jean, que básicamente propone que cuando el argumento de la exponencial está lejos del máximo, esto es, $h\nu \ll kT$; la expresión (2.2) se puede aproximar por una igualdad más sencilla. Entonces, al expandir la exponencial de la siguiente manera,

$$e^{\frac{h\nu}{kT}} \cong 1 + \frac{h\nu}{kT} + \dots \quad (2.3)$$

la función de Planck puede reducirse a la expresión (2.4), en donde λ corresponde a la longitud de onda.

$$B_\nu(T) \approx \frac{2\nu^2 kT}{c^2} = \frac{2kT}{\lambda^2} \quad (2.4)$$

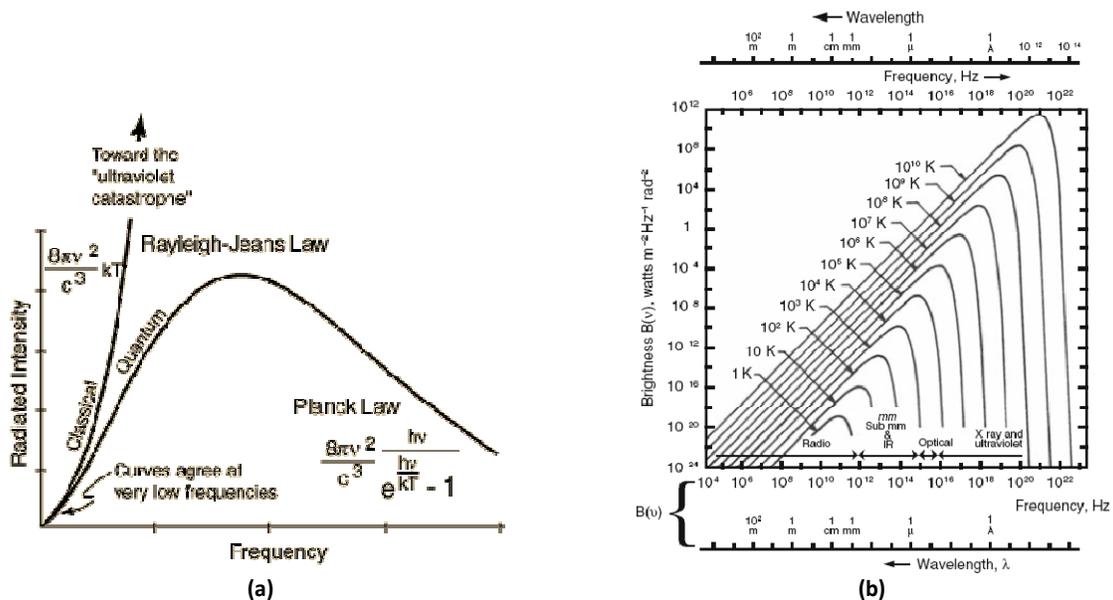


Figura 2.1: Radiación de cuerpo negro. (a) Se resalta la aproximación de Rayleigh – Jean. (b) Se muestra el espectro de Planck para cuerpos negros de diferente temperatura.

Como se puede apreciar en la figura 2.1.a, la curva de la radiación de cuerpo negro se puede linealizar por tramos, lo cual permite para el radiómetro en estudio, usar modelos como el explicado en el anexo B. Así también, en la figura 2.1.b, se exponen las curvas asociadas a cuerpos negros de diferente temperatura, en donde se observa las longitudes de onda – y las consiguientes bandas de frecuencia – en las que se desarrolla cada caso.

2.3. Radiación al Atravesar un Cuerpo Semitransparente

Se requiere ahora conocer el comportamiento de la radiación al atravesar un cuerpo semitransparente, como por ejemplo, la atmósfera, que es de gran interés en esta memoria. Al catalogar a un cuerpo de semitransparente, se quiere decir que éste puede tanto absorber como emitir. Como punto de partida entonces, resulta bueno describir el campo de radiación en función de la variación de la intensidad de la misma a lo largo de alguna dirección.

$$\frac{dI_\nu}{ds} = -I_\nu \cdot \alpha_\nu + \varepsilon_\nu \quad (2.5)$$

En esta ecuación, I_ν es la intensidad específica por unidad de área, también conocida como brillo; ν corresponde a la frecuencia; s es la distancia a lo largo del camino de propagación; α_ν el coeficiente lineal de absorción; y, ε_ν dice relación con la capacidad de emisión del cuerpo. Tanto α_ν como ε_ν consideran el efecto de *scattering*⁵, sin embargo es bueno destacar que para microondas este efecto puede ser despreciado, aun en presencia de nubes.

Luego, la ecuación (2.5) tiene casos límite en los cuales la solución es bastante sencilla. Algunos de estos extremos corresponden al caso en que sólo se emite ($\alpha_\nu = 0$), o bien cuando únicamente se absorbe ($\varepsilon_\nu = 0$). En este caso específico, se debe tomar en cuenta que para las frecuencias en estudio las moléculas se pueden considerar en equilibrio termal, al menos de forma local⁶. Entonces, la ley de Kirchoff dice que se puede hacer la siguiente aproximación

$$\frac{\varepsilon_\nu}{\alpha_\nu} = B_\nu(T) \quad (2.6)$$

⁵ *Scattering* es un proceso físico en el cual algunas formas de radiación, como la luz, el sonido, o partículas con movimiento, son forzadas a desviarse de su trayectoria recta por efecto de una o más partes no uniformes del medio en que viajan.

⁶ El equilibrio termal global se da en situaciones muy específicas como por ejemplo, en el interior de estrellas.

siendo T la temperatura física y $B_\nu(T)$ la función de Planck (2.2) descrita en la sección anterior. Dado que I_ν y $B_\nu(T)$ suelen diferir – salvo en el caso de equilibrio termal global – y con el objetivo de resolver la ecuación diferencial en cuestión, resulta útil definir una profundidad óptica τ_ν como sigue

$$d\tau_\nu = -\alpha_\nu ds \Rightarrow \tau_\nu(s) = \int_{s_0}^s \alpha_\nu(s) ds \quad (2.7)$$

Utilizando τ_ν , unido a la aproximación vista en (2.6), es posible reescribir la ecuación (2.5) como se expone a continuación

$$-\frac{1}{\alpha_\nu} \frac{dI_\nu}{ds} = \frac{dI_\nu}{d\tau_\nu} = I_\nu - B_\nu(T) \quad (2.8)$$

cuya solución para la intensidad específica se muestra en (2.9)

$$I_\nu(0) = I_\nu(s_0) \cdot e^{-\tau_\nu(s_0)} + \int_0^{s_0} \alpha_\nu \cdot B_\nu(T) \cdot e^{-\tau_\nu(s)} ds \quad (2.9)$$

$I_\nu(0)$ corresponde a la intensidad medida en el origen $s = 0$, donde el instrumento se encuentra. La integración asociada se extiende hasta $s = s_0$ donde la radiación se inició con valor $I_\nu(s_0)$. Para el caso de un radiómetro pasivo, esta radiación inicial puede ser la radiación de fondo cósmico a 2,7 K.

Si la temperatura puede ser considerada constante a lo largo del medio estudiado – supuesto que se realiza en este trabajo para la atmósfera, la cual también puede ser considerada como una unión de capas de temperatura uniforme – entonces la integral presente en la solución (2.9) puede ser desarrollada de manera analítica, lo cual arroja la equidad venidera, en donde τ_ν corresponde a la profundidad óptica total del medio.

$$I_\nu^{Out} = I_\nu^{In} \cdot e^{-\tau_\nu} + B_\nu(T)(1 - e^{-\tau_\nu}) \quad (2.10)$$

Como conclusión entonces, se tiene que al atravesar un cuerpo semitransparente, existe una componente de atenuación, dada por el primer sumando, y otra componente de ruido, entregada por el segundo sumando de la expresión (2.10). Una manera de analizar esta expresión y aplicarla a datos medidos con un radiómetro se explicita en el anexo B.

2.4. La Atmósfera

La presente memoria tiene como uno de sus objetivos principales el estudio de la opacidad de la atmósfera. Es por lo tanto relevante tener una idea general de cómo está estructurada y cuáles son sus componentes y características fundamentales. Esta capa de gas está compuesta por N_2 (78%), O_2 (21%) y argón (0,93%). Todo el resto de los elementos presentes se puede medir en partes por millón, razón por la cual no se detallan en este caso. En la figura 2.3 se pueden apreciar las diferentes capas atmosféricas con una breve descripción de cada una. Es importante resaltar que el rebote de señales a 200 [km] de altura, exhibido en la figura recién mencionada, con una flecha de color naranja, corresponde solamente a ondas de frecuencia menor a los 60 [MHz].

Considerando que la temperatura de la atmósfera no es constante conforme se aumenta en altura, es bueno ver el perfil que describe dicho comportamiento (figura 2.2). Esto principalmente como soporte a la búsqueda de modelos que permitan analizar los datos que se obtengan con el radiómetro de la mejor manera posible, ya que toda medición que se obtiene, trae una componente de la atmósfera, siendo trascendental ser capaces de separarla y ponderar su influencia.

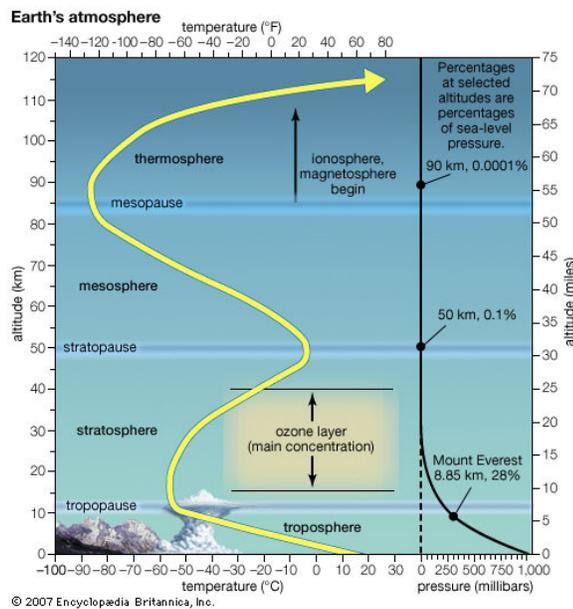


Figura 2.2: Capas atmosféricas y su temperatura.

Cabe destacar que debido a la existencia de mucha agua en la tropósfera, la atenuación causada en dicha capa sobre las señales recibidas, disminuye de manera considerable. La influencia del agua en las ondas se explica en la sección que viene a continuación.

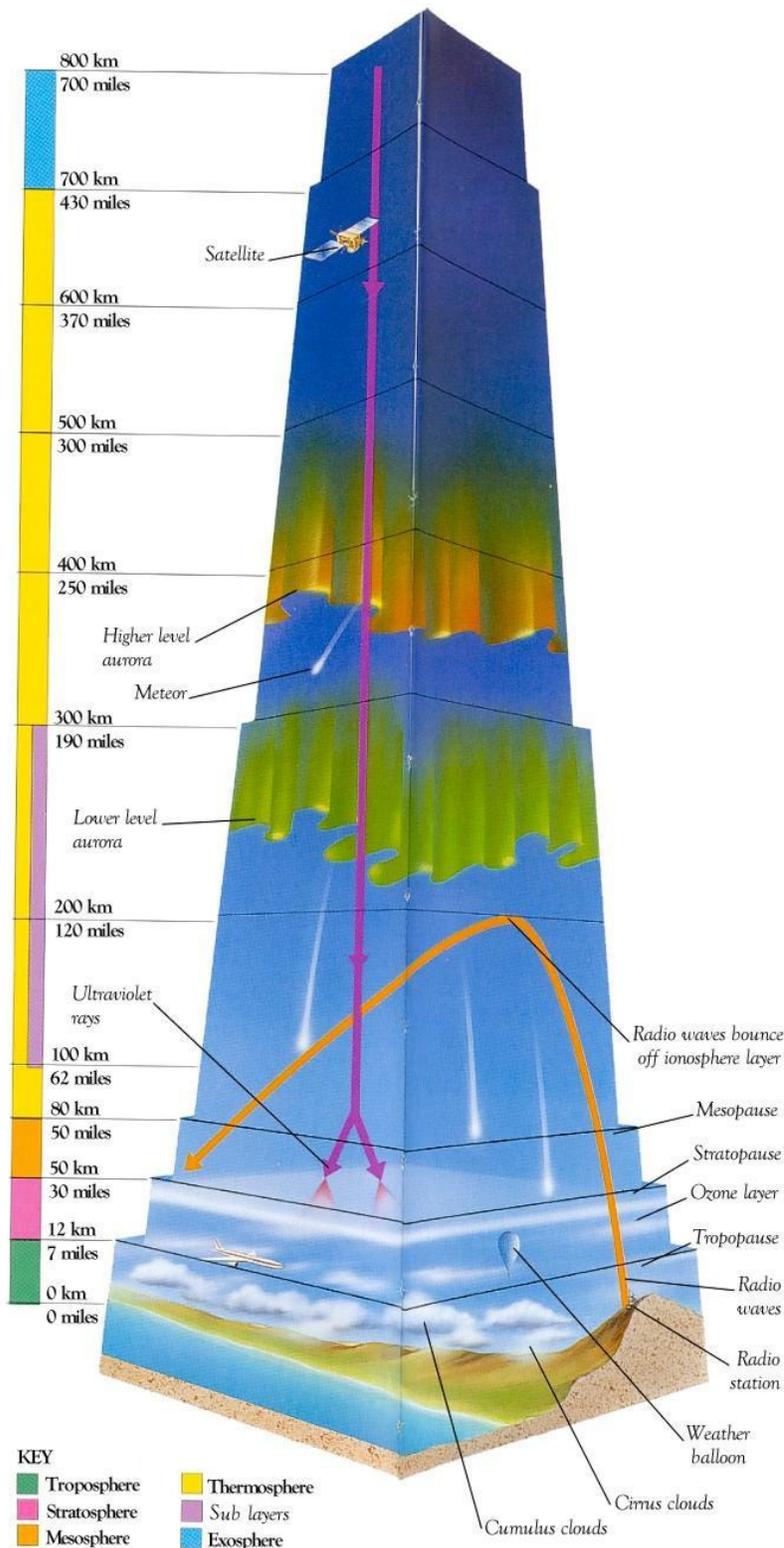


Figura 2.3: Descripción de las capas de la atmósfera.

Tropósfera: Es la capa más baja. Va desde La Tierra a los 12[km] de altura. La gran mayoría de lo que se conoce como “clima” (formación de nubes, precipitaciones, etc.) ocurre en esta capa. Su límite con la Estratósfera es denominado Tropopausa.

Estratósfera: Va desde los 12 a 50[km] de altura. Obtiene su calor principalmente de la absorción de los rayos UV provenientes del sol. Es bastante estable, teniendo un máximo de temperatura cerca de la Estratopausa (límite con la Mesósfera). Ahí, el ozono y UV son también máximos.

Mesosfera: 50 a 90 [km]. En ella está la menor temperatura de toda la atmósfera (180 [K]). Esto se da en la Mesopausa (límite con la Termósfera).

Termósfera o Ionósfera: Va desde los 85 a los 700 [km]. Posee subcapas, conocidas como:

- + Kennelly – Heavyside (capa E), a 120 [Km] de altura.
- + Appleton (capa F), ubicada a 160 [Km].
- + Capa Fr, 260 a 350 [Km].

Exósfera: Va desde 700 a 2.000/10.000 [km]. Esto último depende del autor.

2.5. Detección de Señales Débiles en el Espacio

Un gran inconveniente relacionado a las señales que provienen de fuentes ubicadas en el espacio es que deben recorrer enormes distancias antes de llegar hasta la Tierra. Una vez en las cercanías del planeta, deben atravesar la atmósfera. Sólo después de eso, llegan hasta la superficie terrestre. El efecto de este largo recorrido es que la potencia de estas ondas es extremadamente baja, por lo tanto, se hace necesario contar con tecnologías de recepción capaces de detectar estos bajos niveles de potencia. Aun así, existe algunas longitudes de onda que son absorbidas en su totalidad por los gases atmosféricos, especialmente por el vapor de agua, siendo imposible realizar observaciones en esas frecuencias. Afortunadamente, existen una serie de ventanas atmosféricas que permiten observar en la banda de las microondas. En la figura 2.4 se muestra la transparencia de la atmósfera, para distintos niveles de humedad ambiental, para así ilustrar la influencia que tiene el vapor de agua, medido en PWV (*Precipitable Water Vapor*) que corresponde a la cantidad de agua en una columna de aire.

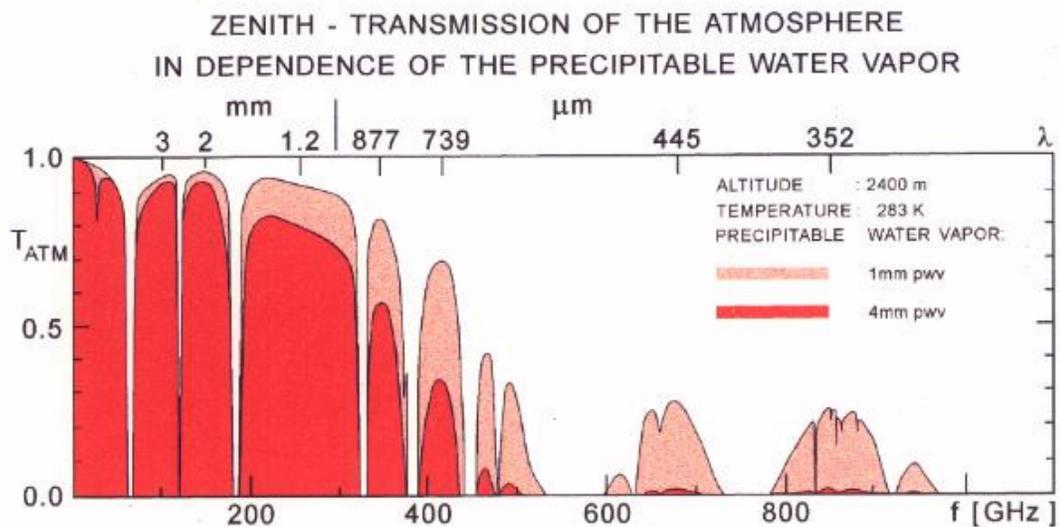


Figura 2.4: Transmisión atmosférica para diferentes longitudes de onda.
Medición a 2.400 metros de altura. Temperatura de 10°C.

En la figura anterior se puede apreciar que en torno a los 115 [GHz], el vapor de agua tiene mucha influencia sobre la transmisión atmosférica, para ambos niveles de humedad mostrados en la imagen. Con mayor exactitud, se puede señalar que existe una línea de atenuación que se produce en 118 [GHz], frecuencia en la cual es complejo hacer mediciones exitosas, dado que existe un alto nivel de interferencia causado por la resonancia de moléculas de oxígeno. Si bien esta línea es bastante definida en situaciones de poca humedad, cuando este parámetro aumenta, se ensancha. Consiguientemente, la ventana de observación alrededor de los 115 [GHz] se angosta, lo que trae como consecuencia el efecto

de atenuación a la frecuencia en la que se está trabajando en esta tesis. Así pues, es de suma trascendencia estudiar de qué manera afecta este inconveniente en el lugar de medición antes de crear grandes proyectos a esta frecuencia. Esto es precisamente lo que se desea realizar con este trabajo de título en pos de no apresurarse en la toma de decisiones que puedan resultar equivocadas más adelante.

Otro problema que se presenta en la detección es que no basta con captar los fotones provenientes desde el espacio, sino que se desea saber exactamente desde dónde provienen. En este punto el diseño de la antena receptora cobra vital importancia, necesitándose que tenga una alta directividad, logrando así una resolución angular adecuada.⁷

2.6. El Receptor Superheterodino

Un radiotelescopio corresponde a un instrumento útil como receptor de ondas de radio provenientes del espacio. Esta captación se lleva a cabo generalmente a través de una antena parabólica (plato), o un conjunto de ellas. Sumado a lo anterior se tiene un receptor que amplifica en una banda determinada, además de un calibrador que genera señales de referencia. Las señales electromagnéticas percibidas por el equipo son muy débiles, lo que se traduce en que no generan niveles de voltaje detectables para su digitalización. Adicionalmente, en el caso de la memoria asociada a este estudio, el receptor con el que se trabajará opera en la banda comprendida desde los 85 [GHz] a los 115 [GHz], valores para los cuales no existen dispositivos digitales adecuados que alcancen velocidades de procesamiento acordes a lo necesario.

Bajo este precedente, surge la necesidad de bajar la frecuencia de las señales de entrada antes de analizar su naturaleza. Para esto, se utilizan receptores superheterodinos similares a los que se emplean en telecomunicaciones, cambiando sólo sus requerimientos y parámetros. Esto se debe a que las características que se busca extraer de las señales, y la precisión deseada en radioastronomía, son distintas al caso de telecomunicaciones.

La principal función de los receptores superheterodinos consiste en convertir la señal de alta frecuencia que se desea estudiar, en una con características parecidas de amplitud – proporcional a la inicial – y fase, pero de baja frecuencia. Considerando el receptor SWMT y relacionándolo con lo expuesto en la figura 2.5, fundamentalmente lo que se hace es mezclar la onda de alta frecuencia (f_{RF}),

⁷ Para mayores detalles ver [14]

onda llega directamente al mezclador. Por otro lado, el oscilador local (OL) envía otra señal. Tanto RF como OL se funden en una onda única. Esto se logra mediante el diplexor, el cual envía la resultante al mezclador o *mixer*, donde la señal es llevada a una frecuencia menor, mediante el proceso heterodino ya descrito con antelación. La señal de frecuencia intermedia (FI) que sale del mezclador es procesada por medio de un espectrógrafo o un detector de ley cuadrática, dependiendo de los propósitos del receptor. Es importante remarcar que el ancho de banda del sistema viene dado por el filtro de FI [8].

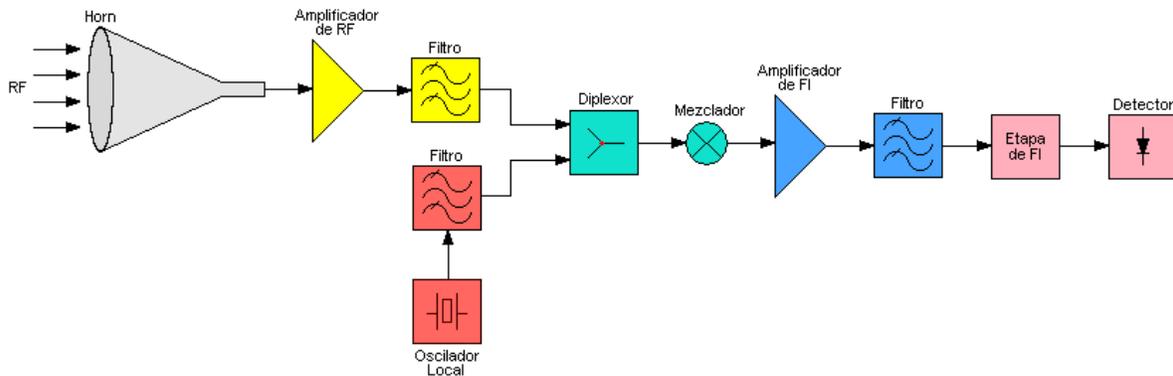


Figura 2.6: Diagrama esquemático de un receptor superheterodino.

2.6.1.- Componentes Principales del SWMT

El sistema del receptor utilizado en este estudio puede dividirse, a grandes rasgos, de la siguiente manera:

- Front – End* : Horn
 Diplexor
 Oscilador Local
 Mezclador
- Back – End* : Etapa FI
 Detector

Como se ha explicitado en el capítulo 1, cabe señalar que en este estudio no se cuenta con el radio telescopio en su totalidad, sino solamente con el receptor superheterodino montado en una plataforma móvil. Al no tener entonces una antena ni la cúpula comúnmente asociada a los telescopios, se suple esta carencia con el uso de un espejo metálico, plano, de forma hexagonal. Luego, las señales provenientes del cielo se hacen rebotar en dicho espejo logrando que ingresen al *horn* y se produzca el proceso ya descrito.

Con respecto a las componentes del sistema, en la figura 2.7 se expone un diagrama de bloques esquemático del receptor del SMWT en su estado actual. Se encuentran destacadas las piezas más importantes, con sus diferentes componentes internas. La imagen señalada exhibe los valores numéricos más trascendentes asociados al proceso heterodino.

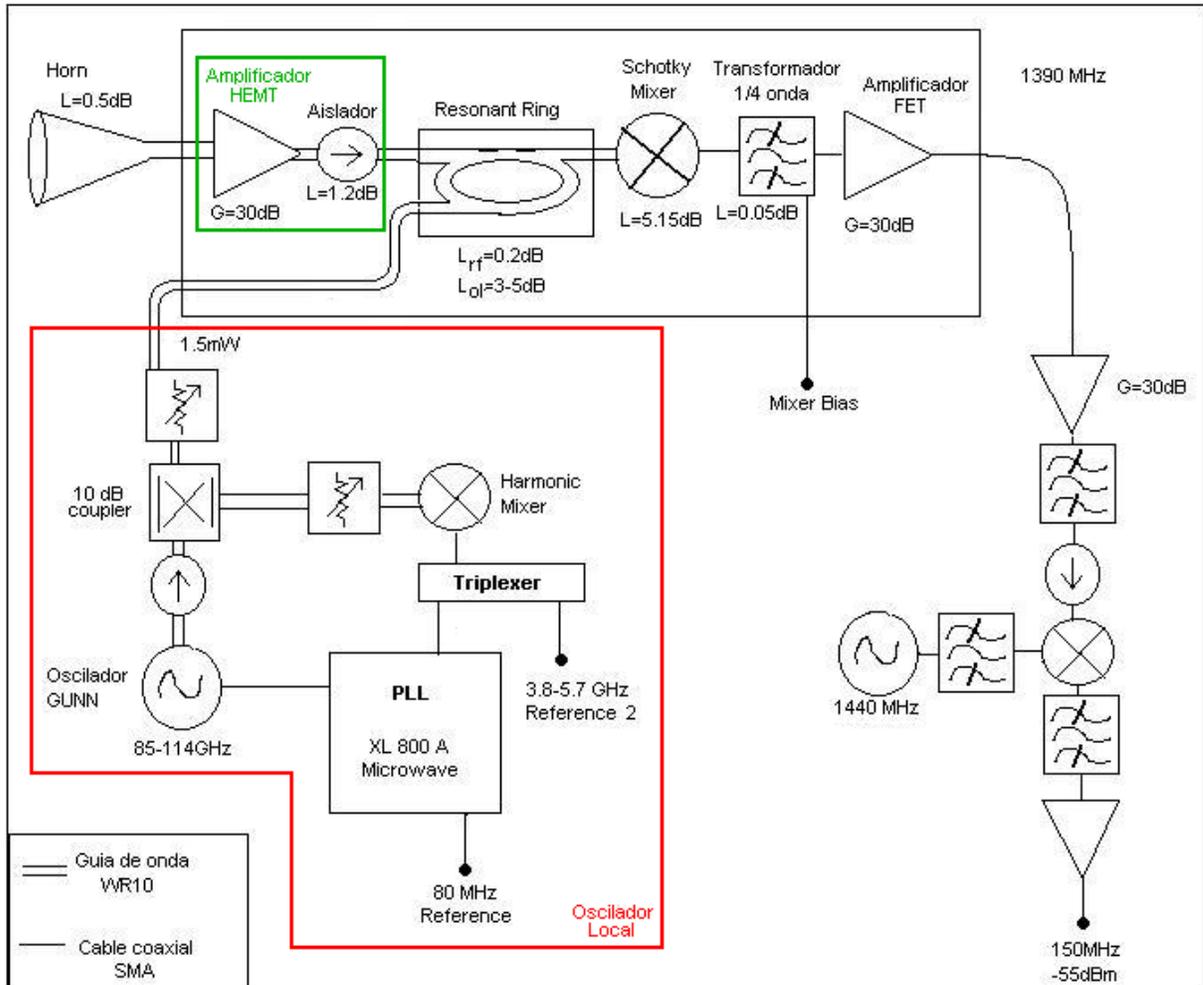


Figura 2.7: Esquema de diseño del SMWT.

2.6.2.- Ruido Generado y sus Inconvenientes

Teniendo en cuenta que las potencias involucradas en radioastronomía son realmente pequeñas, el ruido que exista juega un rol importantísimo. En particular, se sabe que el umbral mínimo de potencia que un receptor puede detectar es determinado por el nivel de ruido que el sistema posee, dado por la naturaleza estocástica de las señales medidas. Este ruido contiene dos componentes principales: el ruido generado por la atmósfera y el ruido que produce el receptor (por su electrónica).

El ruido del receptor puede ser disminuido mediante un diseño adecuado. En este sentido, es relevante saber que todo componente electrónico genera ruido por distintos mecanismos. La principal fuente corresponde al ruido térmico, producido por la agitación térmica de los electrones, y viene determinado por la temperatura a la que se encuentra el elemento. Otras fuentes de ruido son el ruido de disparo, el ruido de baja frecuencia o intermitente (*flicker noise*) y el ruido de Josephson. En suma, se observa que aun cuando el receptor no recibe ninguna señal, mide de todas formas un nivel de potencia a la salida del sistema, correspondiente al ruido generado por el receptor. Esta potencia de ruido determina el umbral de señal que se puede medir según la fórmula

$$\Delta T_{Min} = \frac{T_{Sistema}}{\sqrt{\Delta\nu \cdot t}} \quad (2.11)$$

Donde ΔT_{Min} corresponde a la mínima variación de temperatura que el receptor puede distinguir, $\Delta\nu$ es el ancho de banda del sistema, t es el tiempo de integración y $T_{Sistema}$ es la temperatura de ruido del receptor más la contribución de la atmósfera. La necesidad de solucionar el problema asociado al ruido y disminuir el umbral, radica en que si la señal recibida es menor a este nivel, se confunde con el ruido. De esta forma, la detección de la onda en cuestión se torna imposible. Como ventaja relativa se encuentra el hecho de que el ruido del sistema se puede reducir integrando la señal obtenida en un tiempo t . Sin embargo, se puede ver rápidamente que para tener mejorías considerables, se necesita de una integración en exceso prolongada, dada la raíz cuadrada en la que se ve inmerso dicho factor.

Por otro lado, para equipos en que algún componente tiene una ganancia inestable o bien presenta algún tipo de desequilibrio, la ecuación para el umbral de ruido se ve alterada, lo cual hace más complejo el diseño y más perentoria la necesidad de un manejo adecuado y cauteloso, tanto en la elección de los componentes como en su disposición y funcionalidad. La nueva ecuación de umbral se exhibe a continuación, en donde G corresponde a la ganancia total del sistema y ΔG a las fluctuaciones – más específicamente la varianza – de la ganancia [7]

$$\Delta T_{Min} = T_{Sistema} \sqrt{\frac{1}{\sqrt{\Delta\nu \cdot t}} + \left(\frac{\Delta G}{G}\right)^2} \quad (2.12)$$

El ruido atmosférico en tanto, es bastante más complejo de lo que se suele pensar. Viene dado no sólo por efectos naturales como radiaciones o reflexiones en la atmósfera, sino que también por

artículos hechos por el ser humano, como antenas o torres de alta tensión por ejemplo. Además se sabe que la antena puede recibir el ruido mediante su patrón de captación de señales, y adicionalmente por reflexión en el suelo o en objetos de gran tamaño. Esto generalmente no es controlable, y en ocasiones puede superar el umbral ideado para el receptor. Es entonces importante conocerlo y caracterizarlo con el fin de poder disminuir los efectos negativos que pueda causar. En la figura 2.8 se ilustran las diferentes fuentes de ruido ambiental que se han descrito.

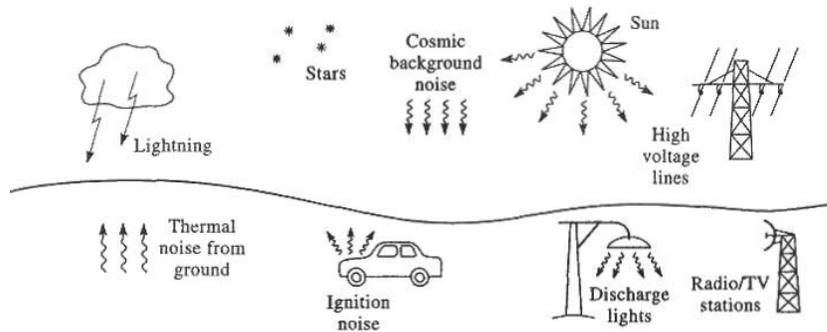


Figura 2.8: Fuentes naturales y artificiales de ruido [8].

Adicionalmente, se conoce la *background noise temperature*, T_B , que dice relación con lo que se conoce como radiación de fondo cósmico. Se cree que ésta corresponde a un remanente del *Big – Bang* tras la creación del universo, y se sabe que esta radiación es isotrópica⁹. Esta temperatura, es de alrededor de 2,7 K, lo cual en muchos casos la hace despreciable dado que su aporte comparado, por ejemplo con la atenuación atmosférica, es mínimo.

Se debe entonces considerar el recién mencionado efecto atmosférico. Se trata de la atenuación, causada fundamentalmente por la absorción de energía de microondas por parte del vapor de agua y por el oxígeno molecular, lo cual se muestra en la figura 2.9. Se puede desprender de la imagen que existen máximos claros en la curva. Los de principal interés ocurren a frecuencias de 22,2 y 183,3 [GHz] y además a 60 y 118 [GHz]. El primer par se debe a la resonancia de moléculas de agua, mientras que el segundo se debe a resonancia de moléculas de oxígeno. Ambos conllevan mayores pérdidas atmosféricas, que a su vez se traducen en mayor ruido. El máximo que se tiene en 118 [Ghz] es el de mayor influencia en el caso del SMWT, dado que funciona como ya ha sido mencionado, a 115[GHz]. Por último, se debe acotar que existen ventanas de observación a 35,94 y 135[GHz], las cuales son de gran utilidad. Adicionalmente, relacionado a lo expuesto en la figura 2.9, se puede apreciar que la máxima absorción ocurre en las frecuencias de resonancia de los elementos nombrados.

⁹ En física, la isotropía se refiere al hecho de que ciertas magnitudes vectoriales medibles dan resultados idénticos con independencia de la dirección escogida para la medida.

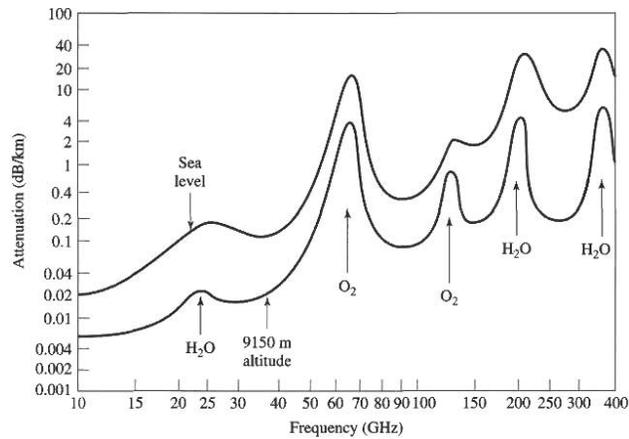


Figura 2.9: Atenuación atmosférica promedio en función de la frecuencia.

Por otra parte, no se puede ignorar el hecho de que las precipitaciones como la lluvia, nieve o neblina aumentan la atenuación, especialmente en altas frecuencias. He aquí la importancia de esta memoria, que pretende estudiar la opacidad atmosférica, con el objetivo de saber qué tan buenas son las condiciones de observación en el Cerro Calán, ayudando así a determinar cuán beneficioso sería traer el radiotelescopio en estudio en su totalidad desde Cerro Tololo y cuánto provecho se podría obtener.

Sabiendo entonces el carácter negativo que posee el ruido, resulta importante calibrar el receptor antes de hacer mediciones, para así conocer la sensibilidad que se está teniendo al momento de medir. Esto se explica en detalle en el anexo A.

Capítulo 3

Trabajo Realizado

3.1. Mediciones de Opacidad Atmosférica

3.1.1.- Descripción General

Las mediciones de opacidad atmosférica corresponden a un tópico esencial dentro de este estudio, por lo cual se explicará su metodología. En este sentido, se debe comenzar por destacar que el objetivo primordial consiste en conocer y cuantificar de qué manera interfiere la atmósfera al momento de medir la emisión de una fuente en el espacio. Para esto, se procede midiendo la potencia total detectada en el cielo en diferentes ángulos. Esta potencia corresponde a la integración de las potencias emitidas o existentes a lo largo de la columna de aire comprendida entre la superficie terrestre y el espacio lejano. Después de procesar la información mediante algún modelo en particular que entregue la transmisión del cielo como el explicitado en el anexo B, se debe descontar el efecto causado por el oxígeno – principal agente de perturbaciones a 115 [GHz]¹⁰ – sobre dicha transmisión obtenida. En este estudio, aquel descuento no se lleva a cabo, dejándose los datos preparados para efectuarlo. El motivo se basa en que se necesita una investigación detallada que escapa de los límites de este trabajo.

Como fue esbozado en la sección 1.4, las mediciones de opacidad atmosférica, se efectúan mediante un espejo, controlado por un motor paso a paso¹¹, que refleja las ondas provenientes del espacio, de forma tal que ingresen a un *horn* o bocina cónica, correspondiente a la entrada del receptor superheterodino. En este punto comienza la heterodinación de la señal por parte del receptor estudiado (referirse a sección 2.4). Finalmente, se obtienen los datos desde un medidor de potencia, conectado al computador principal. En la figura 3.1, se puede apreciar lo descrito recientemente.

¹⁰ El oxígeno interfiere a 118 [GHz] de manera bastante exacta. Sin embargo, en condiciones de mayor humedad, la ventana de atenuación se ensancha, generando ruido en las mediciones a 115 [GHz].

¹¹ Esto se cumplió a cabalidad hacia el término del estudio. Para las mediciones anteriores, se manejó el espejo de forma manual. Esto radica en la necesidad de tener datos de manera paralela al trabajo de automatización.

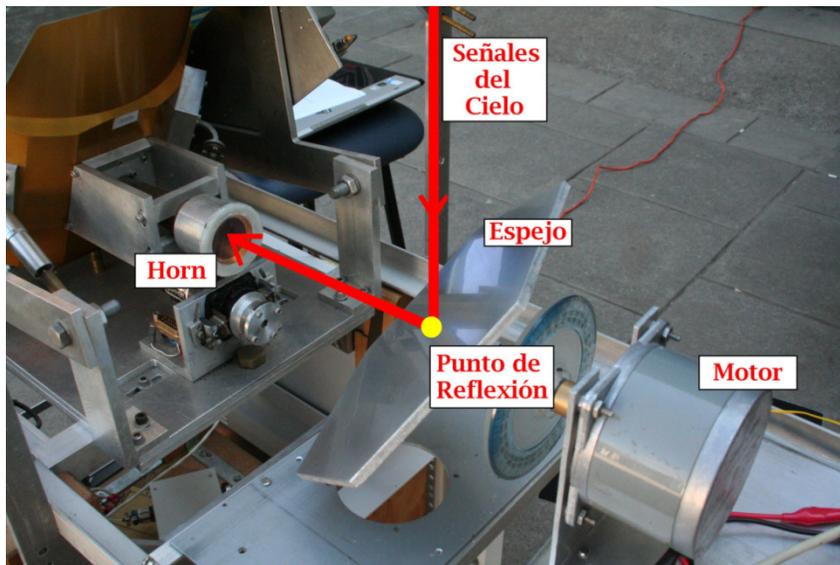


Figura 3.1: Esquema del módulo de medición.

El motor paso a paso corresponde a otro punto de gran trascendencia en esta memoria. Controlado desde el computador por medio de un circuito externo¹², este motor es el responsable de posicionar al espejo en los ángulos necesarios de manera precisa e invariante en el tiempo. Para dicho efecto, se le envían instrucciones desde el ordenador, las cuales llegan al circuito a través de una conexión USB/puerto serial. Además se debe definir un rango de movimiento para el motor que sea constante, de forma tal que una instrucción determinada corresponda siempre a la misma posición del motor. El tema del límite de carrera del motor se retoma en la sección 3.2.

El circuito externo consiste fundamentalmente en un dispositivo PIC, programado con instrucciones sencillas (revisar anexo C), el cual mueve eficientemente el motor a los puntos de interés. Los componentes principales son los siguientes:

- Entrada puerto serial hembra
- Conversor de información puerto serial a protocolo I²C para comunicarse con el PIC¹³
- Pines de alimentación +5 [V] continuos y pines de tierra
- Dispositivo PIC, para manejar la información y controlar el motor
- Conversor de corriente dada la diferencia de consumo entre la parte electrónica y el motor

¹² Desarrollado por Jorge Castillo, estudiante de doctorado quien también trabajara en el estudio del receptor SMWT

¹³ I²C (*Inter-Integrated Circuit*) es un bus de comunicaciones en serie. Diseñado por Philips, la velocidad es de 100 [Kbits/s] en el modo estándar. También permite velocidades de 3.4 [Mbit/s] en versiones más sofisticadas. Es usado principalmente para comunicar microcontroladores y sus periféricos en sistemas integrados (*embedded systems*), y de forma más general, para comunicar circuitos integrados entre sí que normalmente residen en un mismo circuito impreso.

- Protecciones y botón de *reset*
- Conector circuito – motor
- Conexión entre pines específicos del PIC y colector de sensores del motor

La aplicación recién descrita se exhibe en la figura 3.2. En tanto, en el anexo C se adjunta además del algoritmo de programación del controlador PIC, la especificación de cómo conectar el motor paso a paso al circuito en cuestión – el conector se puede apreciar en la figura recién mencionada – de forma de que reciba la información e instrucciones.

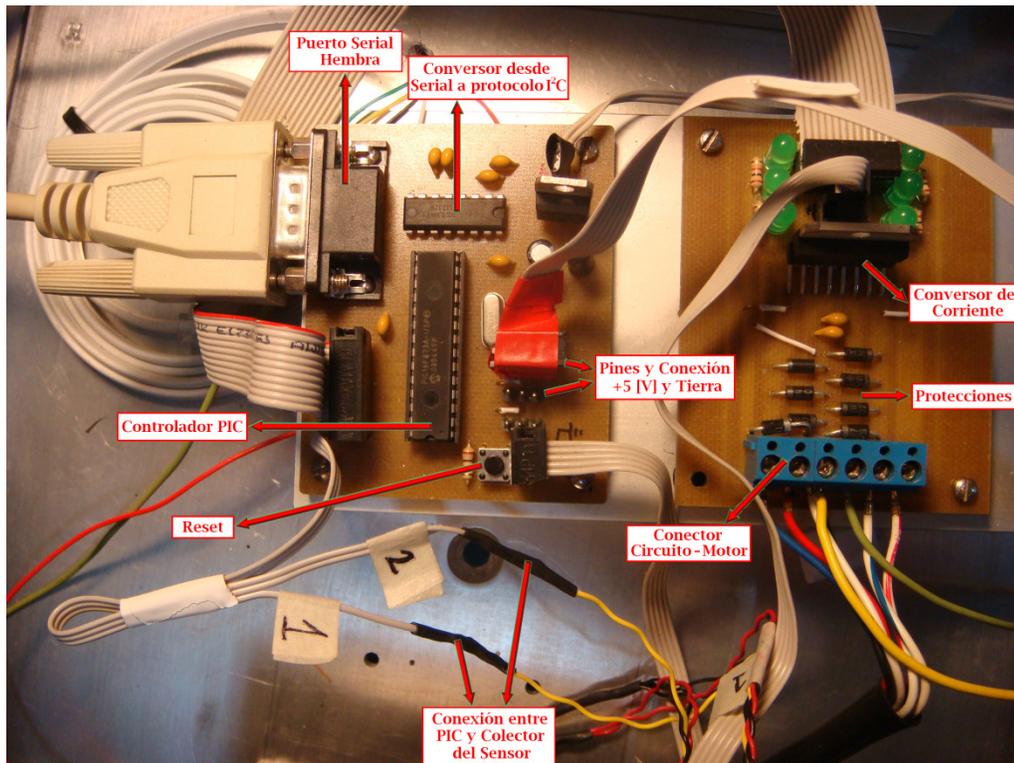


Figura 3.2: Imagen rotulada del circuito externo.

3.1.1.- Metodología de Medición y Calibraciones

Antes de ejecutar las mediciones, se debe llevar a cabo un procedimiento de encendido del receptor y los instrumentos asociados, el cual se encuentra detallado en el anexo D. La estructura y orden en que se sigue este instructivo juegan un rol preponderante, tomando en cuenta la antigüedad y fragilidad de algunos componentes del receptor. Por ejemplo, el encendido, polarización prematura de algún dispositivo, o bien un exceso en la corriente que se hace circular, pueden traducirse en piezas dañadas.

Una vez que el receptor está correctamente encendido y funcionando, el proceso de medición como tal, empieza midiendo la potencia en el cénit – cielo directamente sobre el espejo, que se podría considerar como una línea imaginaria perpendicular al suelo que atraviesa el espejo en el punto de reflexión – el cual es además considerado como referencia angular¹⁴. A partir de dicho punto se toman medidas adicionales en 20°, 40°, 50°, 60° y 70° en dirección Sur.

Las integraciones del cielo se deben intercalar con medidas de una carga caliente conocida – en este caso un trozo de Eccosorb¹⁵ – de manera de evitar el efecto causado por la deriva de los instrumentos de medición, particularmente del medidor de potencia. Es decir, el equipo de medición, con el pasar del tiempo, va obteniendo valores progresivamente distintos, lo cual dice relación con la estabilización del dispositivo. En la práctica este tipo de instrumentos debe encenderse un largo lapso antes de medir si se desea evitar esta derivación, lo cual resulta complejo cuando las mediciones no son tan extensas y continuadas.

Aun cuando el efecto de la deriva de la instrumentación es un fenómeno relativamente conocido, en un inicio del estudio no se le dio la importancia adecuada. Las mediciones entonces constaban de una medida de carga caliente de calibración al inicio del experimento y una medición idéntica al finalizar. Observaciones de la variación – en ocasiones considerable – entre los datos del comienzo y los del cierre motivaron la ejecución de una prueba para conocer el comportamiento del medidor de potencia. En la citada evaluación se midió durante aproximadamente 6 horas en el laboratorio, en primera instancia. En una segunda oportunidad se midió por un lapso de 3 horas a la intemperie. La forma de operar en ambos casos fue tomar 10 segundos de datos cada 5 minutos. Los resultados fueron categóricos y se exhiben en la figura 3.3.

¹⁴ A esta convención se le conoce como *zenith angle* ó ángulo cenital, que en palabras simples se podría definir como el ángulo entre la posición sobre el observador y un objeto en el cielo, como por ejemplo el Sol. El ángulo cenital del Sol es 0° si éste está directamente sobre la cabeza del observador, y es de 90° si el Sol se sitúa sobre el horizonte.

¹⁵ Material sólido cargado magnéticamente. Es utilizado comúnmente como absorbente, atenuador, ó como terminación en guías de onda y líneas coaxiales [18]

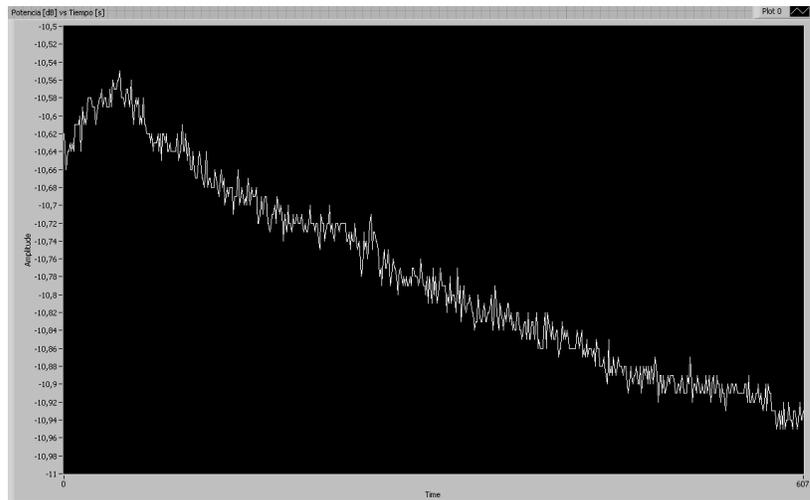


Figura 3.3: Medición de 6 horas (Laboratorio).

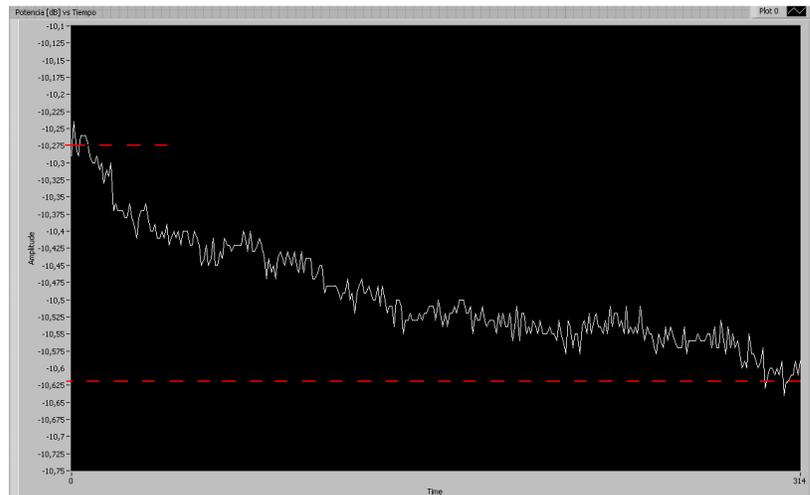


Figura 3.4: Medición de 3 horas (Intemperie).

En la figura 3.4 se aprecian dos líneas punteadas que delimitan los extremos obtenidos en el experimento de prueba del medidor de potencia. Se podría pensar que la diferencia entre el inicio y el término del test – de alrededor de un 3,5% – es numéricamente despreciable. Sin embargo, se debe recordar que en radioastronomía las señales provenientes del espacio son muy débiles y por lo tanto, diferencias mínimas pueden ser muy relevantes al momento del análisis. Así pues, a contar de la realización de este diagnóstico, se optó por medir de forma intercalada logrando obviar el efecto negativo de la derivación. Parece confuso el hecho de que la simple alternancia de medidas sea la que mejore la confiabilidad de los datos, pero como se puede ver en el anexo B, es la diferencia entre el cielo y la carga caliente, la información realmente valiosa.

Entonces, el comportamiento obtenido se condice con los registros conocidos en otros observatorios y receptores a nivel mundial. Más en específico se espera que mientras la potencia medida en la carga caliente va decayendo, el incremento en el ángulo de medición se refleje en la obtención de menos potencia por parte del receptor. Esto tiene su explicación en el hecho de que, al aumentar el ángulo cenital, la columna de atmósfera que deben atravesar las señales para llegar al receptor se engrosa, lo cual conlleva una mayor atenuación. Esto se ilustra en la figura 3.5.

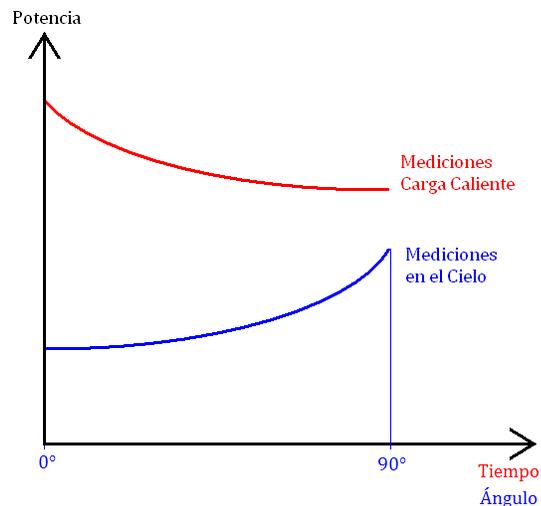


Figura 3.5: Tendencia de resultados esperada para las mediciones de opacidad atmosférica

Existe otro tipo de calibración que se lleva a cabo al momento de ejecutar el experimento. Ésta dice relación con la temperatura de ruido del sistema. Para monitorear este fenómeno se procede midiendo la misma carga caliente utilizada en las mediciones del cielo, seguido de la evaluación de una carga fría conocida. En este estudio se ocupa nitrógeno líquido para este efecto, cuya temperatura es de 77 K. El objetivo de esta prueba radica en estudiar los extremos que puede percibir el medidor, de forma de estimar qué tan precisa es la medición. En este estudio, la temperatura de ruido es alta y bordea los 900 K. Esto se debe a que el receptor está diseñado para trabajar enfriado por nitrógeno líquido, el cual se debe poner en el interior de un criostato asociado al sistema. Se probó que esta condición no es del todo necesaria para obtener buenos resultados de opacidad atmosférica, y considerando las complicaciones ligadas a mantener el criostato frío y al vacío, se obvió. En el anexo A, se adjuntan las fórmulas relativas al cálculo de la temperatura de ruido.

A lo largo del trabajo se busca tener un patrón estándar, para de darle una continuidad al estudio. Es por eso, que se investigó qué parámetros era necesario registrar en cada sesión de medidas. Probando y tomando en cuenta otros estudios publicados, se creó una base de datos adecuada de forma

tal de tener a disposición toda la información necesaria al momento de hacer procesamiento e interpretaciones. Por ejemplo, el estado del cielo y la temperatura son trascendentales, pero también lo son temas que podrían parecer irrelevantes como la hora en que se efectúa la medición y cualquier comentario que pudiera surgir, relacionado ya sea al procedimiento mismo, o bien, a los resultados obtenidos, que como se vio en la figura 3.5, se espera que sigan una tendencia reconocible y definida.

Sería provechoso estudiar la correlación entre los datos meteorológicos en la zona de Cerro Calán y la atenuación atmosférica incorporándolo a un modelo único y más robusto. Esto no es una tarea simple, ya que si bien se podrían aventurar teorías basadas en la influencia intuitiva que ejerce la humedad y la presión, se debe ser cauteloso. Primero se debe considerar que la atmósfera no solamente comprende la capa inmediatamente unida a la superficie terrestre, sino que se trata de un manto de kilómetros de espesor, en donde las propiedades físicas van cambiando a medida que se aumenta la altura. Por otra parte, es primordial tener en cuenta que las integraciones ejecutadas al medir consideran toda la columna desde la superficie hasta la fuente de emisión, razón por la cual se debe considerar la atmósfera como una componente del resultado y no como un indicador del comportamiento total.

3.2. Limitación de Rango del Motor

Una tarea logística asociada a la automatización del sistema, consistió en definir la manera en que se movería el motor paso a paso que controla el espejo de medición del receptor. Esta decisión es de bastante relevancia, ya que una mala elección podría llevar a resultados deficientes y probablemente por asuntos de tiempo sería prácticamente imposible alcanzar a cambiar la metodología de trabajo. Después de sondear diferentes posibilidades, y dado que ya se tenía un circuito operativo de conexión entre el motor y el computador – consistente en un componente PIC, programado para comunicarse y mover el motor – se optó por aprovechar dicho circuito, controlando los límites de movimiento mediante sensores de fin de carrera. El objetivo principal es definir el rango exacto de pasos que puede dar el motor, de forma tal que se mantenga constante a lo largo del tiempo – en especial de un día a otro, aun cuando se apague el equipo – estando sujeto solamente a calibraciones esporádicas. Teniendo el intervalo claro y bajo el precedente de que el PIC del circuito externo ya estaba efectivamente programado para ejecutar calibración y comprender el accionar de los sensores, es relativamente simple entregarle órdenes al motor, mediante iteraciones de LabView, para que tome las medidas necesarias en la configuración y orden deseados.

El sensor elegido corresponde a un diodo que emite en infrarrojo y a un fotodarlington NPN. Se prefiere este formato por encima de un diodo emisor unido a un fototransistor NPN ya que al tenerse dos transistores en vez de uno, la respuesta es más precisa, suave y efectiva (el sensor actúa cuando en el camino del infrarrojo emitido se interpone una superficie metálica). Para ilustrar de qué se habla, se muestran los esquemáticos de ambas opciones para su comparación en la figura 3.6.a. Adicionalmente en la figura 3.6.b se muestra una foto del elemento real¹⁶.

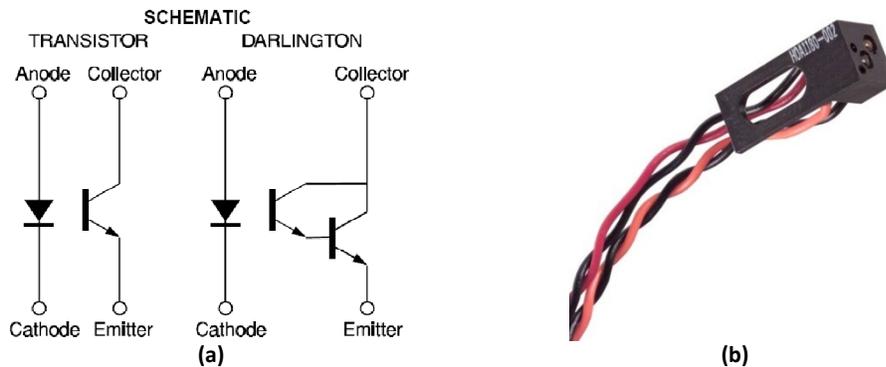


Figura 3.6: Sensor HOA1180. (a) Diagrama esquemático de los dos tipos de sensores disponibles. (b) Apariencia física del sensor.

3.2.1.- Implementación y sus Inconvenientes

Una vez recibidos los sensores se ejecutaron algunas pruebas, relacionadas principalmente a los rangos de operación, con el fin de no malograr los dispositivos por exceso de corriente. Además se efectuaron estudios acerca de la sensibilidad y distancia máxima de activación de los sensores, puestos en el contexto del sistema. Ambos análisis se llevaron a cabo en el laboratorio.

Entonces, mediante el uso de una fuente de voltaje continua se constató que los sensores se encienden con un mínimo de 1,2 [V] y 20 [mA]. Luego, dada la configuración del circuito de control del motor, basta con conectar los sensores a un pin de +5 [V] continuos presente en la placa del mencionado circuito. Sin embargo, es necesario interponer una resistencia de 200 [Ω] entre las partes descritas, con lo cual se logra el mínimo necesario para el correcto funcionamiento de los elementos. Se puede ver en la figura 3.7, un esquemático de la conexión efectuada, en donde además se resaltan los colores reales de los cables involucrados.

¹⁶ Ambas opciones descritas, además de las dimensiones físicas y valores nominales se pueden estudiar en la hoja de datos, adjunta en el Anexo F.

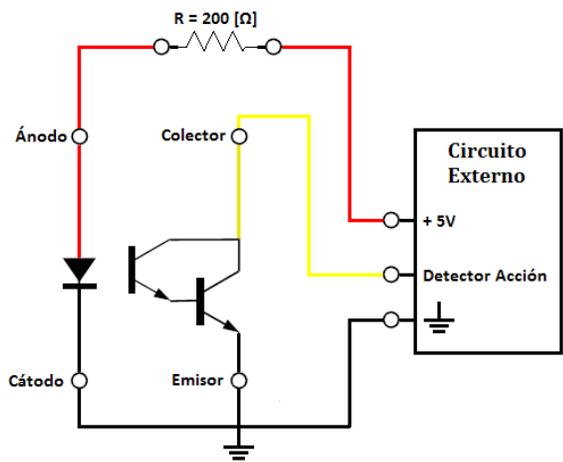


Figura 3.7: Esquemático de conexión entre sensores HOA1180 y circuito externo

Lo que se describe como Detector de Acción en la figura 3.7, corresponde a un pin del controlador PIC, uno para cada sensor como se percibe en la figura 3.2, programado de forma tal que al entregar el comando de calibración del motor, ambos detectores quedan en alerta. Así pues, usando el ángulo de visión de la figura 3.9, se tiene que el motor comienza a girar hacia la derecha. Al interponerse una pieza metálica frente a la emisión en infrarrojo del sensor, éste actúa cortocircuitando colector y emisor, lo que equivale a unir eléctricamente el pin detector de acción con tierra. El contacto con tierra es interpretado por el circuito externo como el fin del rango permitido, razón por la cual el motor cambia su sentido de giro, y avanza hacia la izquierda hasta que vuelve a suceder lo mismo con el segundo sensor. Luego de operar ambos dispositivos, el motor se posiciona en la mitad del intervalo que detectó. Entonces, una acertada ubicación de los mecanismos infrarrojos, asegura un rango que permita la movilidad deseada. Para mayor comprensión se expone la figura 3.8 en que se observa el sensor, y a su vez, la pieza metálica encargada de hacer que los dispositivos operen.

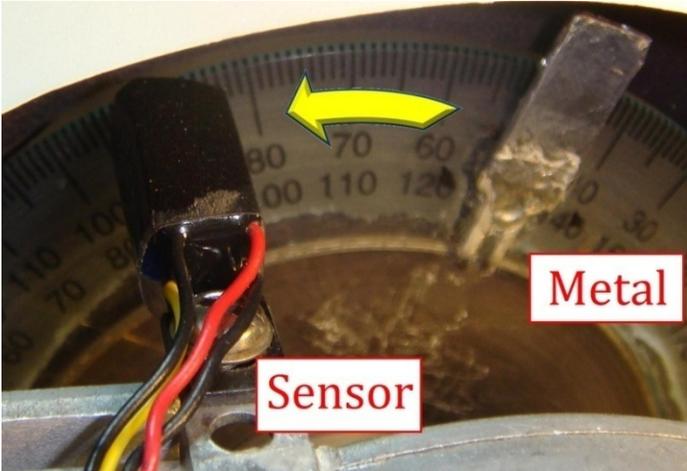


Figura 3.8: Esquema de interacción entre el sensor HOA1180 y la pieza metálica de reflexión.

Relacionado al tema de operación de los sensores, se estudió la distancia efectiva de funcionamiento. Se pudo apreciar que es bastante flexible, incluso más de lo explicitado por el fabricante. La activación del dispositivo se consigue incluso a distancias cercanas a los 2 [cm], en condiciones de laboratorio. Por este motivo no se entregó mayor importancia a dicho ítem en la implementación y disposición física de las piezas, cuidando lógicamente no abusar de las libertades disponibles.

Sin embargo, si bien las pruebas en el laboratorio – e incluso la implementación en el mismo– fueron satisfactorias, se descubrió que la luz ambiental a la intemperie genera problemas en el funcionamiento de los sensores, los cuales no esperan a ser interceptados por una superficie metálica para operar, sino que se activan de manera inmediata al hacer funcionar el motor. La solución a este problema consistió en fabricar una cubierta sobre cada sensor que impidiera la llegada directa de la luz a éstos, como se pudo ver en la figura 3.8. Adicionalmente, se confeccionó una cubierta que protegiera el entorno de los sensores. El resultado global de esta implementación se muestra en la figura 3.9.



Figura 3.9: Implementación de sensores HOA1180

3.3. Trabajo Computacional

En esta sección se describen los programas realizados para la automatización del motor paso a paso. También se exponen labores que se realizan con ayuda del computador, sin influir de manera directa en la ejecución de las mediciones. La unión de ambas partes enriquece enormemente el estudio.

3.3.1. Planilla Excel

Esta parte computacional tiene que ver principalmente con la manera en que se guardan y procesan los datos obtenidos en las mediciones, proceso descrito en la sección 3.1.1. Como se estableció allí, el contexto en el que se llevan a cabo los análisis atmosféricos se relaciona estrechamente con los resultados que se recopilan. Así pues, se hace necesaria la creación de una base de datos completa y confiable, en la cual se detalle cada pormenor del experimento. Se pueden nombrar el estado del cielo, la temperatura ambiental y la hora de medición, entre otras características significativas. Esto que puede parecer simple relleno del entorno, no sólo aporta información valiosa al momento de analizar los datos y teorizar al respecto, sino también en el instante inmediato de la operación, dado que si los resultados observados no se acerca al patrón esperado un determinado día, es recomendable revisar que el receptor esté funcionando de manera adecuada.

Por otro lado, es importante ejecutar algunos cálculos para poder analizar correctamente los datos obtenidos con el radiómetro. Por este motivo, existen dos planillas Excel con las que se trabaja: una de registro de datos y otra en la que se efectúa el cálculo de la transmisión atmosférica. Estas hojas de cálculo debieron ser programadas de manera tal que al ingresar ciertos parámetros y valores de las mediciones, automáticamente se logren resultados. La planilla de registro de datos es la principal, en donde se almacenan: fecha; hora de inicio de las mediciones; los promedios y desviaciones estándar de potencia obtenidos en cada ángulo; los promedios de potencia obtenidos en mediciones de carga caliente y fría, al inicio y término del experimento, y sus desviaciones estándar; el ruido del receptor (explicado en anexo A), para lo cual existe una programación adecuada que calcula dicha cifra; la temperatura medida al interior del receptor; la temperatura ambiente; el estado del cielo; eventuales comentarios que surjan durante el procedimiento; y finalmente, la transmisión efectiva del cielo y el error asociado a ésta, lo cual se calcula en el otro archivo Excel mencionado, dada la necesidad de múltiples datos distintos, y de un proceso engorroso como para ser implementado en la misma tabla de recopilación informativa.

En la hoja de cálculo de transmisión atmosférica entonces, se despliega el tau estimado y la consiguiente transmisión del cielo, con sus respectivos errores de evaluación. Para este efecto se necesita registrar no sólo los promedios de las potencias obtenidas en el cielo y sus desviaciones estándar, sino que se requiere la misma información, pero relativa a las cargas calientes intercaladas que se fueron midiendo en el proceso. Como se esbozó en la sección 3.1.1, es la diferencia entre las mediciones del espacio y las de la carga caliente las que aportan datos de interés para ser procesados. Así pues, en este archivo se aprovecha de graficar la recta obtenida en una regresión lineal del conjunto de puntos obtenidos con el receptor. Es decir, la recta que mejor interpola la linealización – que lógicamente no es perfecta – de los datos. Los cálculos asociados a la transmisión del cielo y a la linealización aplicada mediante un modelo, se explicitan en el anexo B.

Si bien este proceso es manual en el sentido de que se deben ingresar personalmente los datos a la hoja de cálculo de transmisión atmosférica, provenientes de un archivo de texto que entrega el programa de medición, este procedimiento se continúa realizando tan sólo para tener una continuidad en la metodología. El programa computacional que se desarrolló, en su versión final – explicado en la sección 3.3.2 y adjunto en el anexo E – es capaz de entregar estos cálculos, ya efectuados, en el archivo de salida de cada set de datos, necesitándose solamente guardar los resultados en la planilla de registro de datos.

3.3.2. Software de Medición Desarrollado en LabView

Al momento de comenzar esta memoria, existía un programa muy simple de conexión entre el medidor de potencia y el computador. Como se ha mencionado en la sección 1.4, la conexión propiamente tal se maneja con Agilent I/O, mientras que los comandos para registrar mediciones se logran con LabView. El instrumento de medición funciona de manera continua siendo el computador el responsable de guardar sus valores por el tiempo que se estime conveniente. Así pues, se contaba con un programa inicial que medía arbitrariamente 10 segundos – en la posición que se encontrase el espejo, que se debía mover de forma manual – y tan sólo entregaba un archivo con una lista de valores (una medida por segundo) para cada sesión realizada. Esto tornaba muy engorroso el proceso, ya que se debía situar el espejo en el lugar indicado – con el consiguiente error asociado a la manipulación del equipo – y luego guardar cada archivo de resultados por separado en una carpeta definida, con la respectiva información en el nombre del archivo, relativa a la fecha, ángulo y temperatura, entre otros. Más tarde, acceder a ellos era lento y desordenado, prestándose para múltiples confusiones. Además, el

precario software desplegaba en pantalla un gráfico en tiempo real – o cercano a tiempo real – con los valores que se iban obteniendo al momento del experimento. Si bien, el algoritmo cumplía con el objetivo esencial de guardar los datos obtenidos, no ejecutaba ninguna otra de las muchas acciones que se requieren. Empero, al menos se contaba con una base para trabajar, la cual se puede ver en la figura 3.10.

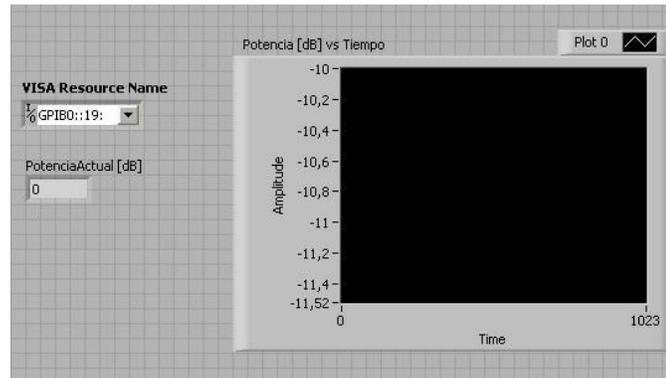


Figura 3.10: Programa de medición inicial desarrollado antes del presente estudio.

Dada la necesidad de medir la opacidad atmosférica a diario, de manera paralela a los avances en el software, la forma de trabajar fue una mezcla entre mejoras en el procedimiento de medición y modernizaciones en el programa. Es por esto que las primeras versiones computacionales para medir en el cielo, mantuvieron el control manual del espejo, mientras se enriquecía el algoritmo de LabView.

Pasando a la descripción misma del trabajo, el primer apronte consistió en lograr que el tiempo de medición fuera un parámetro controlable. Inmediatamente después, se buscó que para cada set de datos – por ejemplo para diez segundos de datos tomados en un determinado ángulo del cielo – los valores entregados fueran promediados y se obtuviera la desviación estándar asociada. Lo trascendente fue hacer que estos dos valores descritos aparecieran en el archivo de texto de cada medición, con una rotulación adecuada como se muestra a continuación:

```
> Valores:      -10,39      -10,39      -10,38      -10,40
                -10,41      -10,38      -10,39      -10,40
                -10,40      -10,41

> Potencia Promedio: -10,39

> Desviación Estándar: 0,01
```

Tomando en cuenta lo explicado en la sección 3.3.1, se conoce que la información usada en los modelos aplicados son los promedios de las medidas obtenidas. Entonces, si bien no resolvía el problema de lleno, este avance hizo que la transcripción de datos a las planillas Excel fuera bastante más llevadera

y efectiva. El próximo desafío correspondió a que el programa de medición generara un archivo único para cada proceso de medición – varias medidas manuales, explicitadas por el usuario con un nombre, ejecutadas cada una al apretar el botón “Medir” – contemplando además datos como la fecha y hora, de inicio y término. Además, se programó que el mismo software fuera el encargado de preguntar el estado del cielo y si existen comentarios que realizar con respecto al comportamiento del receptor o el contexto del experimento. Esto ocurre al indicarle al programa “Generar Archivo” mediante un botón asociado. La manera en que el programa muestra estos resultados se ejemplifica en el anexo E, mediante la inclusión de un archivo de salida del programa, en el cual se encuentran también los avances técnicos que más adelante se explicitan.

El último adelanto ejecutado en este programa, antes de comenzar con el software netamente automático consistió en que exista una constancia de las medidas ya ejecutadas en la pantalla de interfaz, además de señales de alerta mientras se mide. Con esto se busca evitar que el usuario presione botones o altere alguna medición mientras éstas se llevan a cabo.

Una vez comprendido a cabalidad el funcionamiento del motor paso a paso, se efectuó la integración de todos los logros obtenidos para el programa de medición manual, en un programa automático definitivo. Vale decir, se hicieron todos los arreglos tanto estéticos como funcionales que se describieron anteriormente, entre los que destacan el pedido de comentarios al generar el archivo, la obtención de un archivo de texto único, etc.

El primer desafío en la parte de automatización global del sistema, como puede parecer lógico, consistió en lograr una adecuada comunicación entre el computador y el motor vía LabView. Antes, esta comunicación sólo se ejecutaba mediante el software Agilent I/O, que recibe instrucciones manuales en una interfaz propia y muy sencilla. Como la idea principal es que el software final consista en un algoritmo autosuficiente que pueda interactuar de manera intermitente y robusta con el motor, resultó muy relevante superar esta barrera. Así pues, aprovechando la compatibilidad entre las plataformas disponibles, se consiguió manipular el motor desde el programa principal, desarrollado, ya está dicho, en LabView.

Aprovechando lo anterior, el paso siguiente fue tener un movimiento controlado del motor, y por ende del espejo de medición, al ángulo deseado y posteriormente a esto que se ejecutara una medición del cielo en dicho ángulo. Es importante declarar que todo esto se programó y probó pero no

quedó implementado en primera instancia, debido a no contarse con los sensores de limitación de rango expuestos en la sección 3.2. Con esto se quiere hacer hincapié en que si bien el motor respondía a las órdenes y luego de moverse el espejo, el programa medía; el movimiento ejecutado no estaba calibrado.

Sin embargo para adelantar trabajo, se dejó programado un botón “Calibrar”, que abre un programa secundario encargado de enviar un comando al motor. Éste, en respuesta, cuenta los pasos que hay hacia ambos lados, mostrando además una alerta de operación y una cuenta regresiva del tiempo estimado que queda para terminar la prueba. La manera de entender que debe dejar de contar consiste en que dos pines del controlador PIC asociado al circuito externo de control, hagan contacto eléctrico con tierra, como ya fue esbozado en la sección referente a los sensores. Al no tener bien calibrado el motor, el ángulo efectivo al que se dirige este elemento puede ser incorrecto. Lo importante de esta etapa es que el software interactúe efectivamente con el motor y ejecute mediciones posteriores sin tener errores computacionales ni interrupciones en la operación. Para que se tenga una visión más completa de la metodología de trabajo, en la figura 3.11 se adjunta una imagen del diagrama de bloques del programa de calibración. De esta manera, se quiere ejemplificar cómo es la programación visual que permite LabView y de qué forma se utiliza.

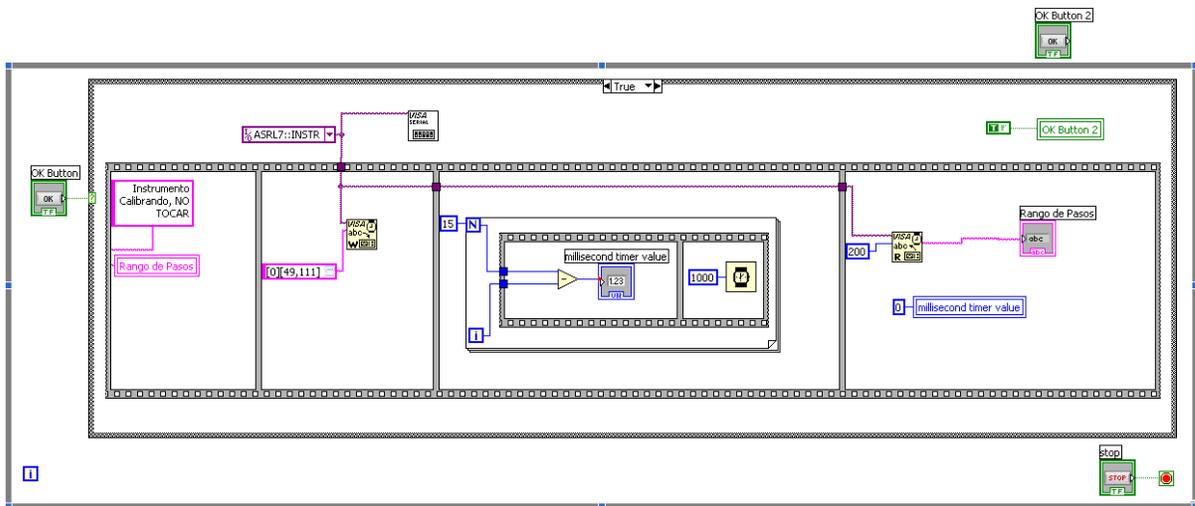


Figura 3.11: Diagrama de bloques de LabView de subprograma de calibración

Siguiendo el orden lógico del desarrollo, apenas se recibieron los sensores y se ejecutaron las pruebas previas, se procedió a la implementación descrita en la sección 3.2.1. Con estos dispositivos instalados y operativos – lo que significa que el rango de actuación del motor es siempre el mismo – se hizo necesaria la evaluación de correspondencia entre ángulos del espejo y el paso de motor asociado a dicho ángulo, para así completar y poner en funcionamiento el procedimiento de calibración del motor

que se encontraba inconcluso. Este estudio se ejecutó de manera cautelosa ya que gran parte del objetivo de medir de manera automática radica en la exactitud y precisión que esto implica. Detalles numéricos de la asignación de pasos del motor al programa de LabView se entregan en el anexo G.

Otra variable que necesita ser monitoreada cotidianamente es la temperatura de ruido que posee el receptor al momento de medir. Como ya ha sido explicado, la manera de conocer esta cifra corresponde a la medición de una carga caliente de temperatura 293 K aproximadamente y luego una carga fría, de nitrógeno líquido, cuya temperatura es de 77 K. Se realizó otro programa secundario que se abre al presionar el botón “H-C Test”, cuya función corresponde a ejecutar este estudio, moviendo el motor a las dos diferentes posiciones – a 270° para la carga caliente y 149° para la carga fría – preguntar la existencia de comentarios y luego guardar la información en un archivo de texto. La información más trascendente de dicho archivo corresponde a la temperatura de ruido calculada, la cual también se adjunta al archivo de texto global del proceso de medición, además de mostrarse en la interfaz principal.

Finalmente, para tener mediciones automáticas de forma definitiva, se hizo necesaria la programación de cálculos matemáticos, relacionados al ruido y la transmisión del cielo. Para esto se utilizó la compatibilidad entre MatLab y LabView. Es decir, en el diagrama de bloques interno de los programas de medición, tanto del primario (opacidad atmosférica), como del secundario (medición de ruido), se usaron cuadros programados en lenguaje de MatLab – lo cual se ejemplifica en la figura 3.12 – para lograr que se desplegara en las respectivas interfaces los valores procesados para cada ítem. Detalles acerca de los códigos de MatLab desarrollados, se pueden ver en el anexo H.

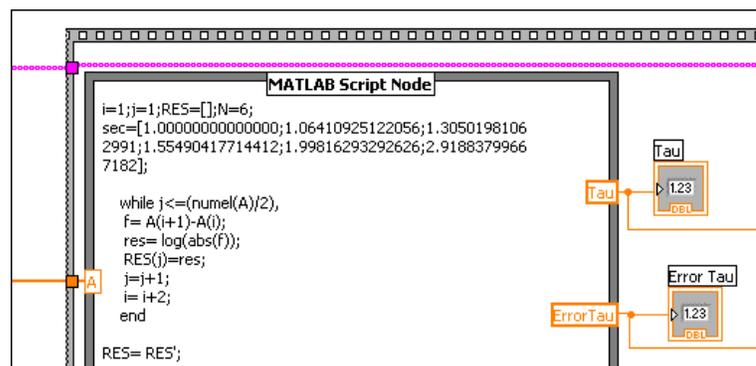


Figura 3.12: Diagrama de bloques de LabView mostrando una instancia de MatLab

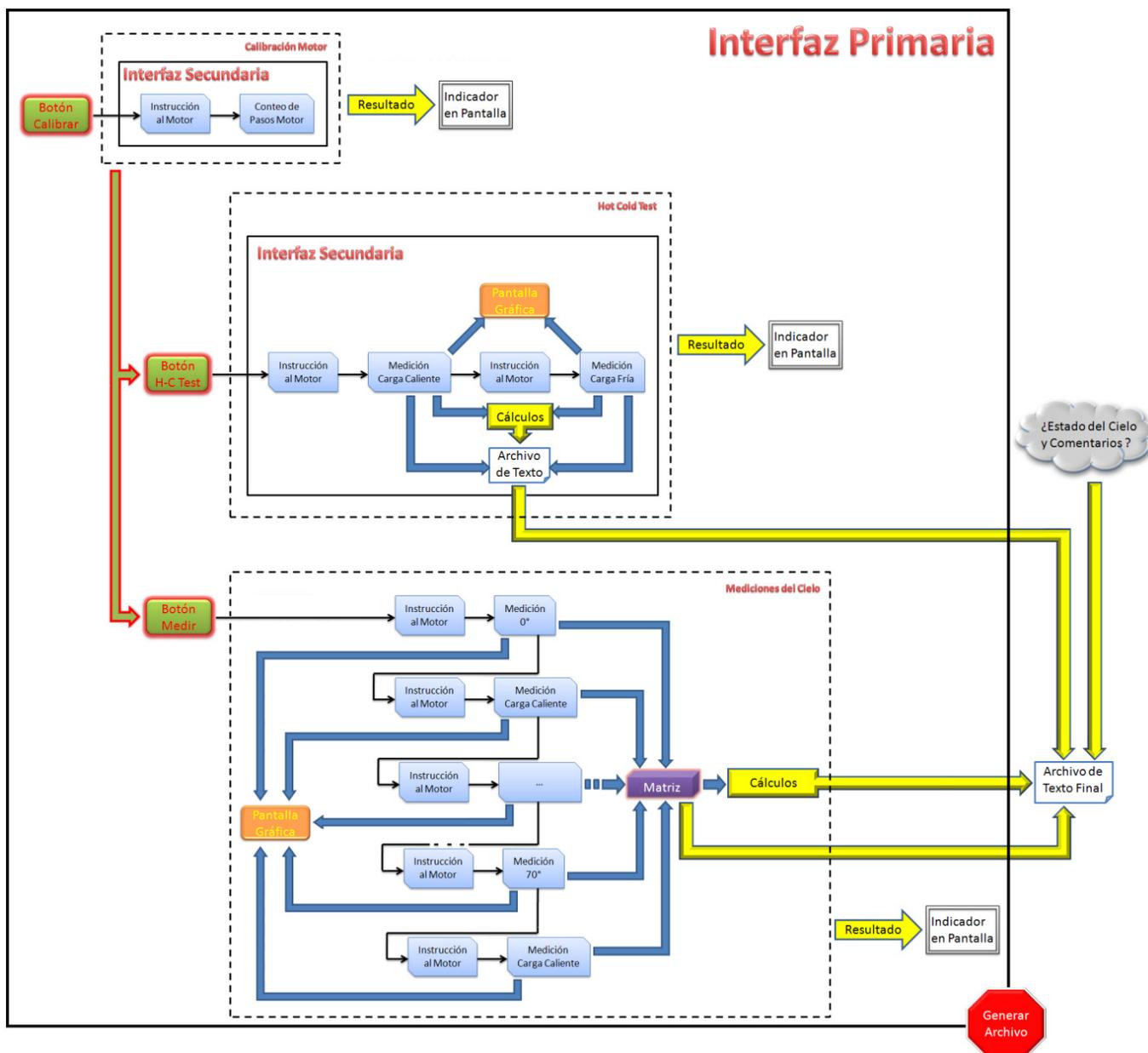


Figura 3.13: Diagrama de bloques software automático de medición

Englobando entonces todas las funcionalidades del software desarrollado, es útil estudiar un diagrama de bloques que explique la filosofía de acción del programa y el orden secuencial que éste posee. En la figura 3.13, se puede apreciar los componentes primordiales y su desempeño teórico. Como resulta lógico, tanto el test de ruido, como las mediciones, sólo se pueden llevar a cabo después de haber calibrado el motor, para que éste tenga un rango definido y las instrucciones que reciba tengan sentido y sean coherentes con el movimiento realizado como respuesta. Esto también se esboza en el diagrama de bloques, mediante una flecha verde de secuencia. Es importante en este sentido aclarar, que el orden en que se lleven a cabo las dos posibles acciones de medición no influye en el resultado

final ni en el archivo de salida. De hecho, cuando no se cuenta con nitrógeno líquido, la prueba de ruido simplemente no se efectúa, lo cual no afecta en nada el procedimiento¹⁷.

A modo de cierre de esta subsección, se apunta que la descripción de los logros computacionales llevada a cabo, tiene un carácter más bien cualitativo, para no entregar detalles que puedan resultar molestos al lector. Para ahondar, en el capítulo 4, se da mayor profundidad a los resultados obtenidos en el trabajo, desglosando la plataforma gráfica obtenida, con sus diferentes partes y funcionalidades.

¹⁷ En este último caso, en el archivo de salida simplemente se leerá "H-C Test: No se realizó".

Capítulo 4

Resultados Obtenidos

En este capítulo se presentan y discuten los resultados del estudio realizado. Tal como sucedió en la explicitación de los objetivos de esta memoria, se dividirá el análisis en dos grandes partes: las mediciones de opacidad atmosférica y el desarrollo de automatización computacional. En relación a la parte computacional, cabe señalar que los resultados expuestos dicen relación más bien con la apariencia física de las interfaces diseñadas. Esto se debe principalmente a que en el capítulo 3 ya se describió de manera detallada la funcionalidad del software.

4.1. Mediciones de Opacidad Atmosférica

Se procede ahora a mostrar los resultados más relevantes obtenidos durante este estudio, en cuanto a mediciones de opacidad atmosférica se refiere. Se tienen cifras adquiridas desde mayo de 2008 hasta junio de 2009. En este sentido, es bueno resaltar que las mediciones correspondientes a mayo y junio de 2008 fueron realizadas por otra persona antes del comienzo del presente trabajo. Para obtener dichos valores, fue utilizado el mismo receptor, empero el procedimiento de medición no está claramente documentado. Tal situación se debe principalmente a que las mediciones en esa época eran todavía manuales, lo cual complicaba el proceso y originó la necesidad esta tesis.

Desde septiembre de 2008 en adelante, se tiene pleno registro y monitoreo de los procesos, no existiendo datos de julio ni agosto del mismo año. Así pues, en la tabla 1 se muestra el resumen de los distintos valores de τ_v obtenidos durante el período de medición. Como se vio en el capítulo 2, τ_v se refiere a la profundidad óptica, considerada en este estudio como la pendiente de la recta obtenida con la regresión lineal aplicada al conjunto de puntos medidos con el receptor. En adelante se hará alusión a τ_v ó τ indistintamente.

Es importante saber que τ_v debe ser lo más cercano a cero que se pueda, dado que la transmisión en el cielo, como se explicita en el anexo B, corresponde a evaluar la expresión $Tx = e^{-\tau_v}$. Para conocer el contexto en el que se trabaja y sondear qué tan alentadores son los resultados, se

estudia para cuántos de los datos obtenidos, se da que τ_v está por debajo de un determinado valor. En el caso de la tabla 4.1, se destaca a la izquierda una columna de la cual se desprende que, al filtrar la cantidad de mediciones en que $\tau_v \leq 0,31$ se tiene que más de la mitad de los datos recopilados cumplen dicho criterio.

		$\tau \leq 0,31$	$\tau \leq 0,2$	$\tau \leq 0,3$	$\tau \leq 0,4$	$\tau \leq 0,5$	$\tau \leq 0,6$	$\tau \leq 0,7$
2008	Mayo	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
	Junio	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
		0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
		0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31
		0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31
		0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34
		0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
		0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
	Sept.	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36
		0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
		0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31
		0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
		0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
	Oct.	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34
		0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
		0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
		0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
		0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
		0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34
		0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
	Nov.	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
		0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
		0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
		0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
		0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
	Dic.	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
		0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
		0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31
		0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
		0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
		0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49
		0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
		0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
		0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47
		0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41
		0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
		0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
		0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
		0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
		0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32
		0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36

2009	Enero	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
		0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
		0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
		0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41
		0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
		0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
		0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
		0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
		0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
		0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32
Marzo	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	
	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	
	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	
	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	
	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	
	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	
	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	
	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	
	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	
	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	
	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	
	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	
	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	
0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32		
Abril	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	
	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	
	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	
	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	
	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	
	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	
0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32		
Mayo	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	
	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	
	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	
	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	
	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	
	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	
	1,47	1,47	1,47	1,47	1,47	1,47	
	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	
0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27		
Junio	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	
	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	
	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	
	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	
	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	
	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	
	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	
	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	

Tabla 4.1: Resumen de τ , medidos y ordenados según criterio de magnitud.

En la tabla 4.2 en tanto, se sintetiza una comparación entre el efecto causado por la inclusión de los datos previos a septiembre y el hecho de no considerarlos. Es importante comentar que el porcentaje de transmisión que se entrega en la tabla aludida, corresponde a la cota inferior que tienen los datos que cumplen el criterio impuesto en cada caso.

	Incluye Mediciones Antiguas			NO Incluye Mediciones Antiguas		
# Mediciones	89			81		
τ Mínimo	0,11			0,18		
τ Máximo	1,47			1,47		
	# Mediciones	% del Total	Transmisión	# Mediciones	% del Total	Transmisión
$\tau \leq 0,2$	08	9%	82%	07	9%	82%
$\tau \leq 0,3$	42	47%	74%	37	46%	74%
$\tau \leq 0,31$	48	54%	73%	41	51%	73%
$\tau \leq 0,4$	74	83%	67%	66	81%	67%
$\tau \leq 0,5$	85	96%	61%	77	95%	61%
$\tau \leq 0,6$	87	98%	55%	79	98%	55%
$\tau \leq 0,7$	88	99%	50%	80	99%	50%

Tabla 4.2: Comparación entre análisis de datos considerando las mediciones antiguas y sin hacerlo.

Estudiando el paralelo recién presentado, es claro ver que la influencia de los datos tomados en mayo y junio de 2008 no es importante. Es decir, no alteran prácticamente en nada las cifras globales, ya que siguen la conducta promedio obtenida en el segundo ciclo de mediciones. Luego, tomando en cuenta que no entregan información trascendente ni novedosa, que amerite una evaluación exhaustiva; y dado que no se tiene plena certeza acerca del procedimiento con que fueron adquiridos, los datos antiguos no se consideran en el resto de los gráficos y tablas de análisis que se exponen en este capítulo.

En este punto, es relevante acotar que el número de mediciones existentes parecen pocas considerando el período en que se trabajó. Sin embargo, como ya ha sido mencionado, durante esta tesis se debió trabajar de manera paralela en estimar la opacidad atmosférica, y a la vez, en automatizar este proceso. Así, en múltiples ocasiones, avanzar en un ámbito conlleva paralizar el progreso del otro. Por ejemplo, fue necesario adaptar algunas piezas del soporte del espejo, lo cual detuvo las mediciones por un tiempo. Este tipo de pausas en general tuvieron una duración del orden de 3 a 4 días cada una. Por otro lado, hay ciertas situaciones en que simplemente no es posible medir. En particular, la más molesta es la lluvia y la amenaza de ésta. Al trabajarse con un equipo delicado, que tiene muchos circuitos y componentes desprotegidos, no se puede operar en días lluviosos. Más aun, en días en que las precipitaciones parecen inminentes, se opta por evitar riesgos, cancelando el procedimiento. La razón principal para esta cautela radica en el hecho de que para prender y apagar el receptor, se debe seguir

una serie de pasos, cuyo orden es crucial al momento de velar por la integridad del instrumento, como se explica en el anexo D. Por ejemplo, en el caso del mes de junio, 5 días se perdieron debido a la presencia de chubascos, o bien, excesiva humedad en el ambiente, haciendo pensar en la posibilidad de que comenzara a caer agua durante el experimento.

Volviendo al análisis de datos, el gráfico 4.1 resume la información entregada en la tabla 4.2. Es decir, en qué número de mediciones, de un total de 81 registradas entre septiembre de 2008 y junio de 2009, se da que τ_v está por debajo de un determinado valor. Como fue indicado con antelación, existen dos casos de particular interés. Por una parte está la cota superior para la cual, al menos la mitad clasifica. Por otra, es bueno conocer el τ_v máximo de todo el ciclo de mediciones, para estudiar el peor caso. Ambos sucesos se encuentran destacados en el gráfico, detallando el valor τ_v asociado y qué porcentaje del total de mediciones representan.

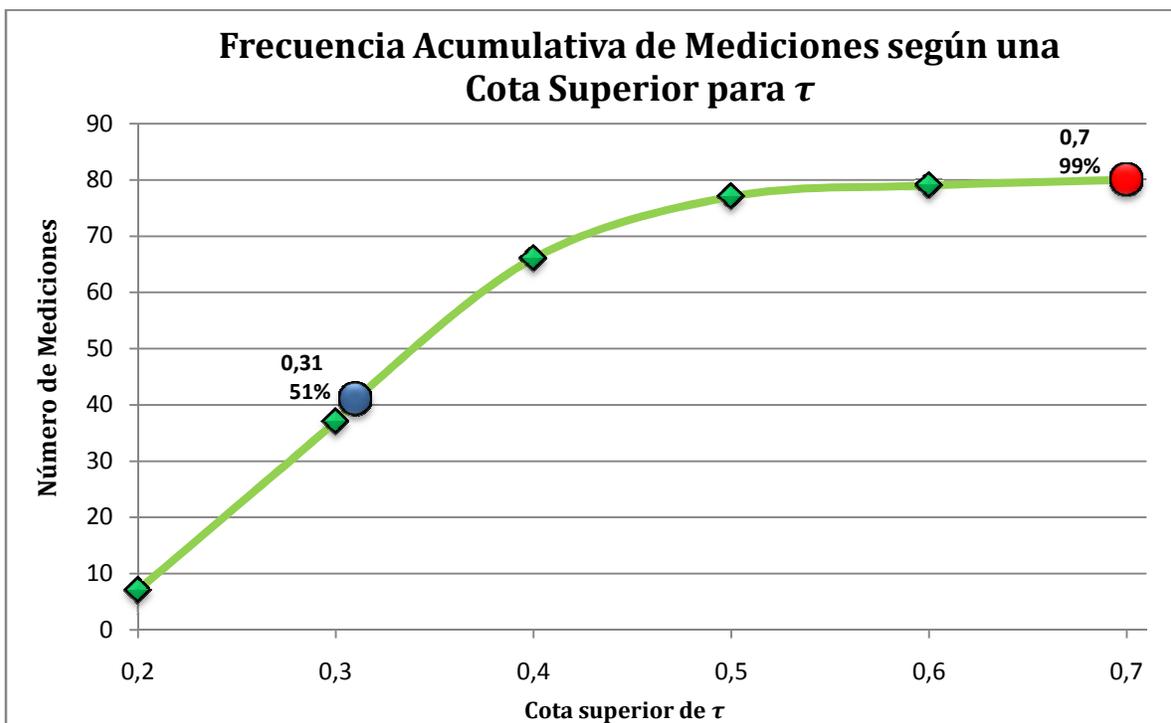


Gráfico 4.1: Frecuencia acumulativa de mediciones según una cota superior para τ

Relacionado a la situación más deficiente, se aprecia en el gráfico 4.1, que el punto rojo declara que un 99% de las mediciones arrojan un τ_v menor a 0,7. Esto corresponde a 80 de las 81 mediciones realizadas. La cifra restante corresponde a $\tau_v = 1,47$, como se vio en la tabla 4.2. Es decir, en dicho escenario se tiene una transmisión de 23%. Si bien se podría pensar en descartar aquella medición por

alejarse considerablemente del promedio, sería un gran error. Este valor, que parece muy equivocado es de hecho una corroboración a la metodología ejecutada, ya que si se revisa la información del contexto meteorológico en que se realizó, se verá que coincide con un día lluvioso. Es más, el cielo se encontraba nublado y muy oscuro. Aun cuando existía un alto riesgo de tener problemas, se midió de todas formas. Afortunadamente la lluvia se desató instantes después de que el receptor se encontraba protegido de regreso en el laboratorio.

Entonces, el hecho de tener un pésimo resultado, se condice con la predicción de que en días húmedos (mucho vapor de agua en la atmósfera) la ventana de observación en torno a los 115 [GHz] se angosta, trayendo como resultado la atenuación de las ondas captadas por el receptor. Con este tipo de situaciones se constata la importancia de llevar un registro del estado del cielo al momento de medir. Esto principalmente dado que el análisis no siempre se realiza de manera inmediata.

Para ordenar cronológicamente los resultados, en el gráfico 4.2 se explicita cuántas de las mediciones cuyo valor de τ_v es inferior o igual a 0,31 (correspondiente al 51% del total) ocurrieron en cada mes. Es decir, en cuántos casos se obtuvo como mínimo un 73% de trasmisión. Además se enseña a qué porcentaje del total de mediciones realizadas en cada mes corresponde cada caso.

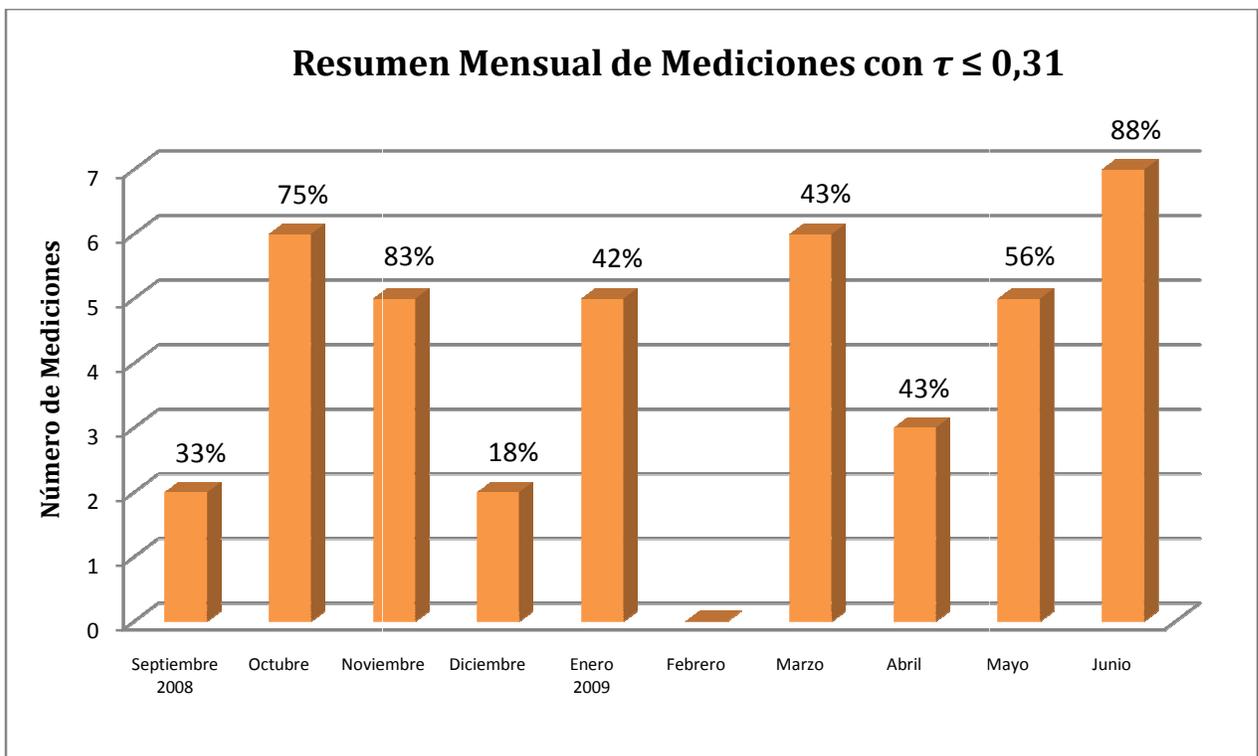


Gráfico 4.2: Resumen mensual de mediciones con $\tau \leq 0,31$

El comportamiento medio del parámetro τ_v a lo largo del período de estudio, también es un tópico de interés. Si bien no es tan representativo dada la diferencia en la cantidad de medidas con las que se cuenta en cada mes, sirve para dar una idea aproximada de la conducta a lo largo del año. En el gráfico 4.3, se exhiben los promedios mensuales obtenidos.

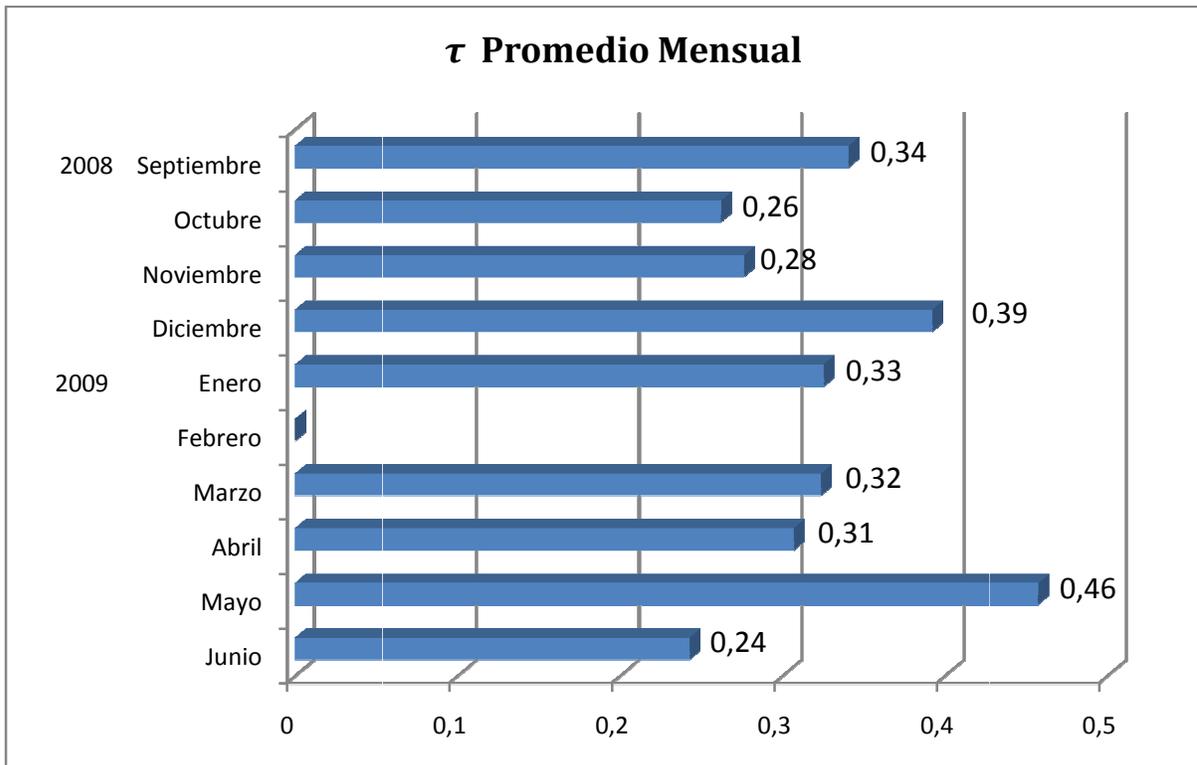


Gráfico 4.3: τ promedio mensual

Hasta ahora, los resultados han sido expuestos como un compendio de muchísima información condensada. Entonces, es provechoso analizar la conducta del receptor al ejecutar un proceso de medición individual. Es decir, al barrer el cielo entre 0° y 70° , intercalando esto con la evaluación de una carga caliente. Luego, en la figura 4.1, se expone un resultado real tomado en un día cualquiera. Se ocuparon los mismos colores que en la figura 3.5, en la cual se vio que existe una tendencia esperada bastante definida. Por una parte para la carga caliente, dada la deriva del equipo; y por otra para las mediciones angulares del cielo, debido al grosor de la capa de atmósfera que deben atravesar las señales para llegar al receptor en cada caso. En este caso, por ser una medición que toma poco tiempo, la deriva del medidor de potencia no se percibe, sin embargo en la sección 4.1.1 se ven ejemplos en los cuales es claro dicho efecto.

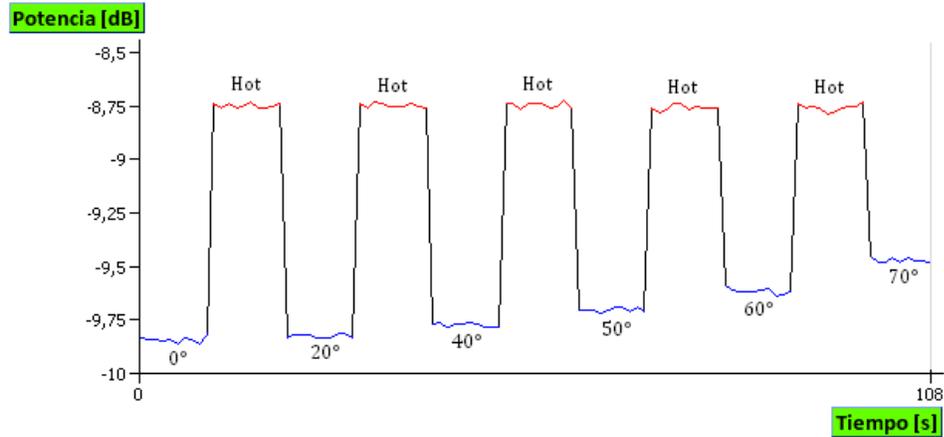


Figura 4.1: Resultados gráficos de un procedimiento de medición

Se puede apreciar que en las mediciones angulares, se cumple el resultado esperado. Esto, además de servir como aliciente al estudio en general, sirve al momento mismo de llevar a cabo los experimentos diarios, ya que si el gráfico obtenido, visualmente se nota corrupto o extraño, se debe revisar tanto la metodología como el correcto funcionamiento de las diferentes partes del sistema. Podría por ejemplo, no estar operando adecuadamente el medidor de potencia, o bien, no estar polarizado de buena forma el mezclador, entre otros.

A modo de resumen entonces, se puede señalar que los resultados que han sido expuestos en esta sección son bastante satisfactorios, considerando Cerro Calán (850 metros) no es tan bueno, en términos de altura, comparado por ejemplo con Cerro Tololo (2.200 metros), ubicación original del radiotelescopio. En este sentido, se obtuvieron niveles de transmisión mayores a lo esperado. Esto es signo de que se pueden llegar a realizar observaciones astronómicas exitosas con este receptor en Cerro Calán al traer el resto de las componentes del radiotelescopio.

4.1.1. Mediciones Extraordinarias

En esta sección se muestran cuatro sesiones de medición que escapan al patrón con el que se llevó a cabo el estudio, en el sentido de que a lo largo del ciclo de trabajo, siempre las mediciones se efectuaron antes del mediodía. Más en específico, la mayoría de los datos que se expusieron fueron adquiridos entre las 9:30 y las 11:00 horas. Dicho intervalo se definió en busca de baja temperatura y reducido nivel de desorden molecular en la atmósfera, lo cual en general empeora al avanzar el día (principalmente en verano). Es fácil ver que estas características se reúnen de mejor manera al medir

más temprano, por ejemplo a las 6:00. Sin embargo por un ámbito práctico y de continuidad del estudio se mantuvo el rango horario como se mencionó.

En base a esto, se despertó la duda acerca de cuál sería el efecto de medir la opacidad atmosférica por ejemplo en la noche. Se describen entonces a continuación, en orden cronológico, los resultados obtenidos, comparándolos siempre con el resultado obtenido en la mañana (en el horario común del estudio) del mismo día.

El primer estudio, ejecutado el 14 de mayo, consistió en medir sólo una vez el cielo en su totalidad en la tarde. Si bien en esta segunda medición del día se vio una leve interferencia al evaluar el cielo en 70°, los resultados no cambiaron mucho. El estado del cielo tampoco varió considerablemente. Pasó de una nubosidad muy delgada en la mañana, a un cielo despejado pero con una leve bruma por la tarde. Los resultados obtenidos se resumen en la tabla 4.3

	Mañana	Tarde
Hora	10:30	16:00
Estado del Cielo	Nubosidad delgada	Despejado con bruma
Temperatura	16°C	19°C
τ	0,35	0,37
Error τ	4%	7 %
Transmisión	71%	69%
Error Transmisión	1%	3%

Tabla 4.3: Medición extraordinaria 1: opacidad atmosférica por la tarde

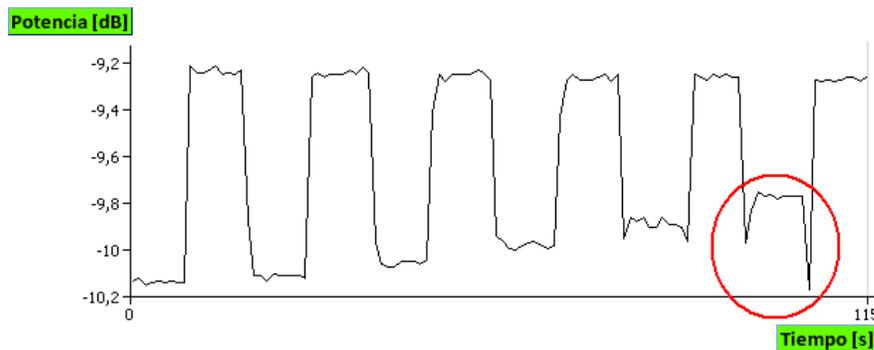


Figura 4.2: Medición extraordinaria 1: opacidad atmosférica por la tarde

Como se puede apreciar, el cambio entre ambas situaciones es prácticamente nulo. Además se muestra en la figura 4.2, la inestabilidad que se obtuvo en los 70° del cielo. Como se ha señalado con antelación, al enfrentar resultados gráficos extraños, se debe revisar el procedimiento. En esta ocasión en tanto, se repitió más veces el experimento, obteniendo siempre los mismos valores y una pequeña

alteración en la medida en cuestión, motivo por el que se descartó la existencia de fallas mayores. Se atribuyó este problema a eventuales interferencias entregadas por antenas o ruido aledaño.

La segunda prueba realizada, surgió ante la duda de cómo se modifican los resultados al medir de manera continua por un tiempo prolongado. Se procedió entonces a instalar el receptor en la mañana – en el horario común – y dejarlo midiendo automáticamente con un tiempo de descanso de 10 segundos entre un set de datos y otro. El estado del cielo fue cambiante, variando entre nubosidad media y alta. Existieron diferentes distribuciones de las nubes, habiendo momentos en que parte del rango estudiado se encontraba despejado y el resto nuboso, o bien enteramente nublado, etc. La temperatura fue relativamente estable. Todo esto se resume en la tabla 4.4.

	Medición Inicial	50 Mediciones continuas
Hora	11:00	11:05 – 14:00
Estado del Cielo	Nubosidad media	Nubosidad Variable
Temperatura	16°C	19°C
τ	0,27	Entre 0,25 y 0,32
Error τ	6%	Entre 1% y 8%
Transmisión	76%	Entre 72% y 78%
Error Transmisión	2%	Entre 0,3% y 3%

Tabla 4: Medición extraordinaria 2: opacidad atmosférica medida continuamente entre las 11:00 y 14:00 horas

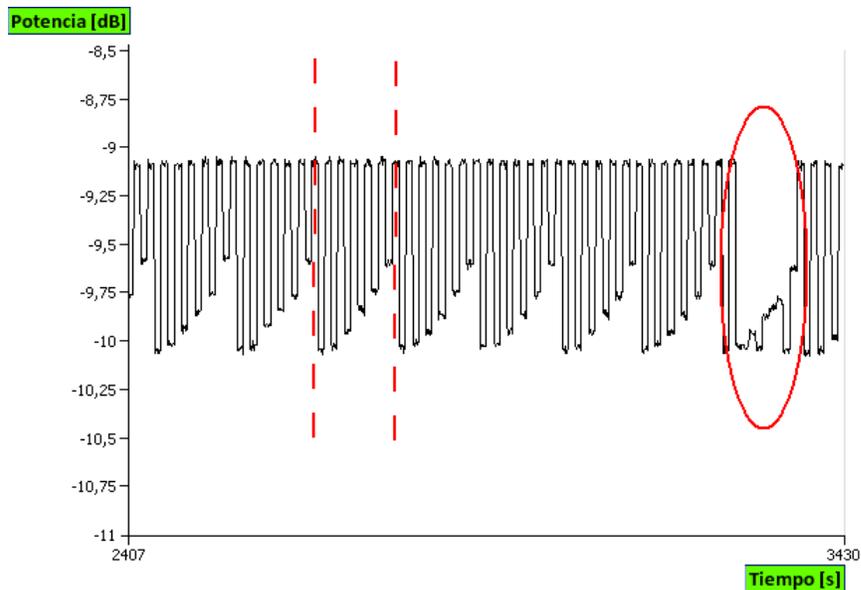


Figura 4.3: Medición extraordinaria 2 (fragmento): opacidad atmosférica medida continuamente entre las 11:00 y 14:00 horas

De la síntesis propuesta en la tabla 4.4, se desprende que no hubo grandes cambios a lo largo de la mañana, aun cuando la nubosidad en el cielo fue bastante dinámica. Hubo una medida excepcional,

que sale de toda lógica. Este extraño dato fue registrado en el preciso momento en que una avioneta sobrevolaba el lugar. A priori no se puede responsabilizar al vehículo aéreo de la interferencia, empero tampoco puede descartarse su influencia. Los número obtenidos con el cálculo automático de transmisión fueron absurdos – un 315% de transmisión con un 626% de error asociado – motivo por el cual no se considero esta medida. El set de datos inmediatamente anterior y posterior a esta anomalía fueron del todo normales, situación que se mantuvo hasta el final del proceso. Esto se puede ver en la figura 4.3, en la cual se esquematiza con línea punteada que tramo de la curva corresponde a un set de datos completo. Se puede nuevamente, y de forma más clara, reconocer el patrón estudiado en la figura 3.5.

Con la motivación de la medida extraordinaria número 2, se procedió luego a repetir este procedimiento, pero en la tarde. Se tomaron 12 medidas, con la intención de asegurar que no existan cambios importantes con respecto a la medición normal de la mañana. Los resultados se resumen en la tabla 4.5 y la figura 4.4. En esta última se puede apreciar la deriva del instrumento, tanto en las mediciones de carga caliente como en las evaluaciones angulares del cielo. Se ve como la curva, por bloques, va cayendo debido a la inestabilidad propia del medidor de potencia.

	Medición Matutina	12 Mediciones Vespertinas
Hora	10:35	15:30 – 16:10
Estado del Cielo	Despejado	Despejado
Temperatura	16°C	20°C
τ	0,21	Entre 0,20 y 0,23
Error τ	3 %	Entre 3% y 7%
Transmisión	81%	Entre 80% y 82%
Error Transmisión	1%	Entre 1% y 2%

Tabla 4.5: Medición extraordinaria 3: opacidad atmosférica medida continuamente entre las 15:30 y 16:10 horas

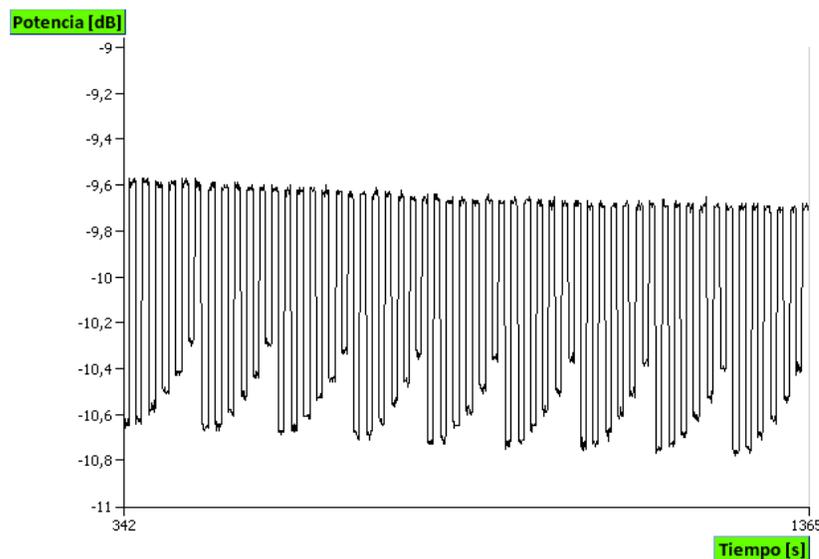


Figura 4.4: Medición extraordinaria 3: opacidad atmosférica medida continuamente entre las 15:30 y 16:10 horas

Finalmente, habiendo medido bastante en la mañana y habiendo hecho una prueba en la tarde, se procedió a medir de noche, para terminar de disipar las dudas acerca de la existencia de variaciones sustanciales en la hora de medición de un mismo día. Se tomó una medida única, en un día en que la temperatura y el estado del cielo se mantuvieron prácticamente constantes durante la jornada. Los resultados se exhiben en la tabla 4.6, no habiendo necesidad de adjuntar una imagen en este caso, por tratarse de un resultado muy común, similar al mostrado en la figura 4.1.

	Medición Matutina	Medición Nocturna
Hora	11:15	20:45
Estado del Cielo	Despejado	Nubosidad Media
Temperatura	10°C	11°C
τ	0,21	0,23
Error τ	3%	6%
Transmisión	81%	80 %
Error Transmisión	1%	2 %

Tabla 4.6: Medición extraordinaria 4: opacidad atmosférica por la noche

Se observa nuevamente que el cambio es despreciable. Se concluye entonces que para días en que el cambio meteorológico es bajo, se tendrá también que los valores obtenidos para τ , y consiguientemente para la transmisión, son relativamente invariantes. Se podrían detectar alteraciones importantes en situaciones en que el clima cambia de manera constante a lo largo de un día o una fracción de este. Coyunturas de este estilo ocurren generalmente cuando se avecina la lluvia, o cuando se alternan momentos de precipitaciones con momentos en que no las hay. De todas formas, días como los descritos son esperablemente deficientes para medir. Por lo tanto, no es sorprendente que simplemente no se pueda operar, o bien, que los datos sean defectuosos.

4.2. Plataforma Gráfica de Medición Automática

En esta sección se presentan imágenes con los resultados del software de medición automático. La idea es efectuar un desglose de las partes funcionalmente más importantes del programa, haciendo alusión a su desempeño y su conectividad con otras componentes. Este enfoque centrado en la imagen se realiza dado que en el capítulo 3 se detalló la operación técnica del programa computacional, sin darle mayor trascendencia a la apariencia visual de las interfaces desarrolladas.

Se seguirá un orden cronológico según cómo opera el programa al momento de medir. Lo primero entonces consiste en conocer la pantalla principal del software en cuestión, al momento de iniciarse. Esto se puede ver en la figura 4.5.

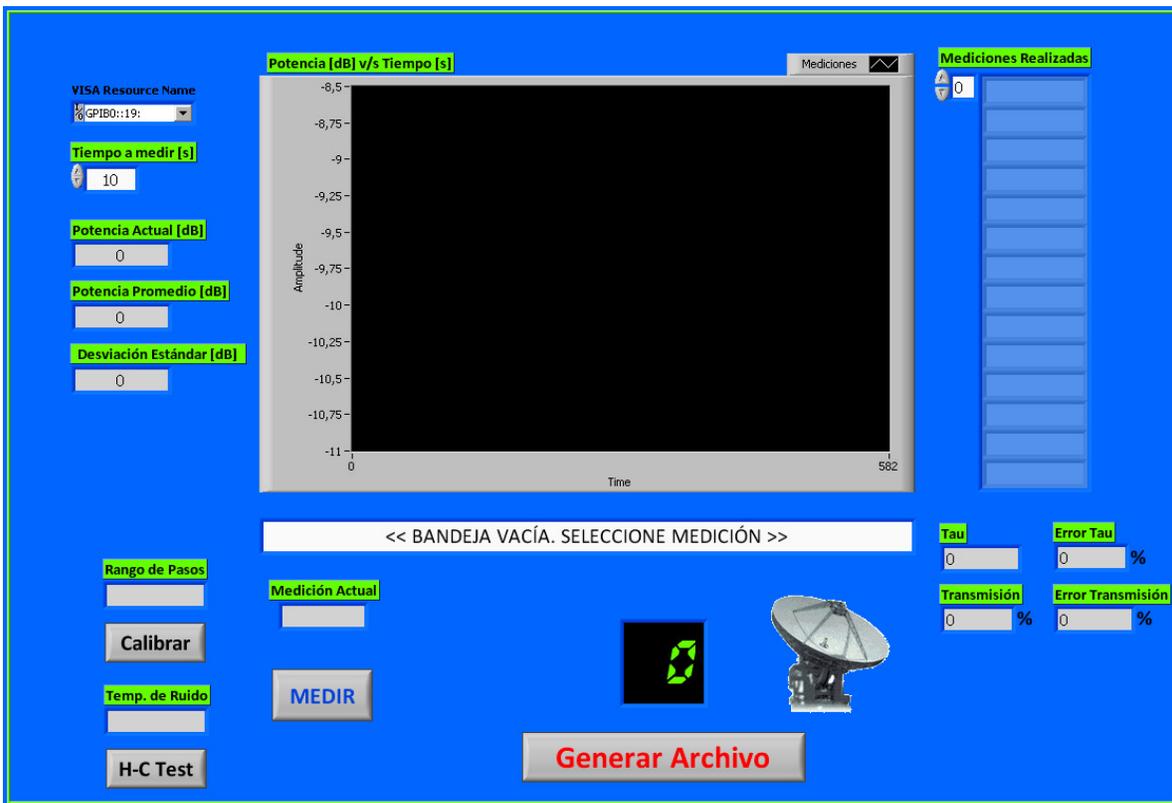


Figura 4.5: Interfaz principal del software de medición automático



Figura 4.6: Botón para calibrar



Figura 4.7: Interfaz secundaria de calibración

Calibración del Motor: Al presionar el botón “Calibrar”, el programa envía al motor la instrucción para que comience el proceso. Inmediatamente después, se despliega una interfaz secundaria (figura 4.7) en la que aparece un mensaje de alerta para evitar que el usuario interfiera en el correcto desempeño de la tarea.

Una vez de terminada la labor, se muestra en un indicador el número de pasos que tiene el motor, lo que se traduce en el rango de movimiento angular que tendrá el espejo.

Se ofrece al operador la posibilidad de repetir la calibración o bien volver al programa inicial. De regreso en la pantalla principal, el indicador mostrado en la figura 4.6 despliega en pantalla el resultado obtenido. En lo posible ese número no debería variar en el tiempo, para lo que se debe seguir un constante monitoreo.

Hot – Cold Test: Al igual que para el proceso de calibración, tras presionar el botón “H-C Test”, comienza el procedimiento, en una pantalla secundaria, con su respectiva señal de alerta.

Entonces, este algoritmo lleva el motor a la posición de 270°, en donde se encuentra apostada la carga caliente, y mide su potencia. Posteriormente va a 149° y espera a que el usuario posicione el recipiente con nitrógeno líquido, y ordene que el trabajo continúe como se aprecia en la figura 4.9. Las mediciones se van mostrando en pantalla en tiempo real, lo cual se puede ver en la figura 4.10. Una vez terminado el procedimiento, se expone el resultado en la pantalla principal, al lado del botón asociado, lo se observa en la figura 4.8.

Finalmente, el programa pide al operador que escriba los comentarios que tenga al respecto y que dé nombre al archivo de salida generado por este subprograma.



Figura 4.8: Botón H – C Test y resultado de la prueba en interfaz principal

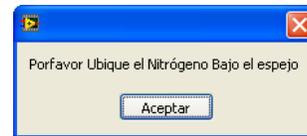


Figura 4.9: Mensaje para ubicar nitrógeno

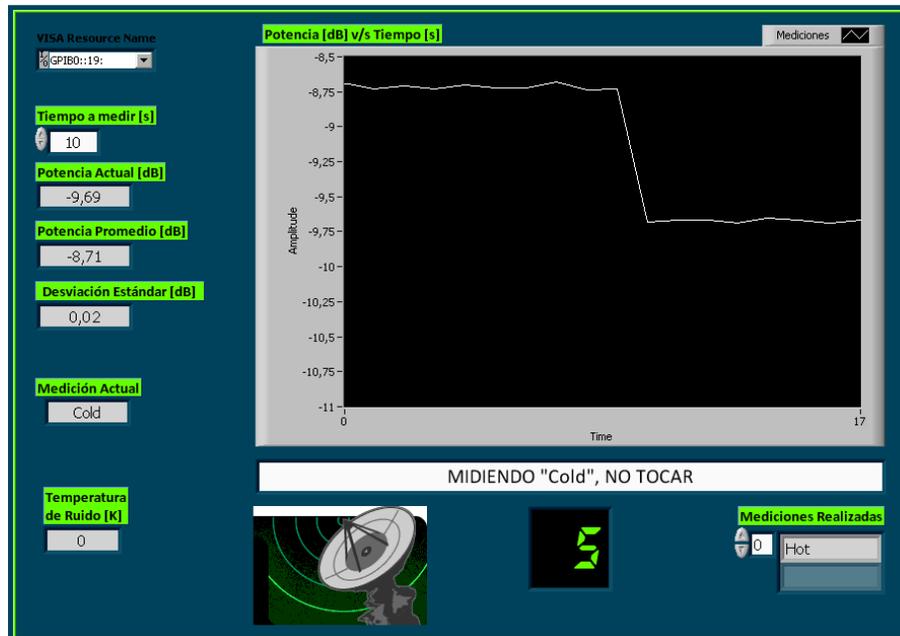


Figura 4.10: Interfaz secundaria de test para medir temperatura de ruido

Mediciones: Este ciclo, que es el más importante del proceso, se inicia al oprimir el botón “Medir”, el que se puede ver en la figura 4.11. Se lleva a cabo en la interfaz primaria y despliega en pantalla los parámetros de interés y algunos resultados parciales.



Figura 4.11: Botón Medir

El software, mide intercaladamente la potencia del cielo y en una carga caliente de referencia. El cielo se evalúa en: 0°, 20°, 40°, 50°, 60° y 70° al Sur.

Finiquitado esto, el programa queda a la espera de nuevas instrucciones. Las opciones son: repetir la prueba de temperatura de ruido; o bien, presionar el botón “Generar Archivo”, exhibido en la figura 4.12. En este último escenario, el computador muestra los resultados finales, calculados internamente. Además pide que se ingrese el estado del cielo, los comentarios y un nombre para el archivo de salida.



Figura 4.12: Botón Generar Archivo

Señales de Alerta¹⁸: Mientras el software opera, tanto en su instancia principal como en la secundaria, se despliegan diferentes avisos que previenen al usuario. La idea es que no se presionen botones en momentos inadecuados, y a su vez, que no se manipulen las componentes físicas del sistema como el motor y el circuito externo entre otros.



Figura 4.13: Señal de alerta

Así pues, la señal de exclamación expuesta en la figura 4.13 está presente en dos de los programas. En la calibración reemplaza a los engranajes vistos en la figura 4.7. En la pantalla principal sustituye a la antena de fondo, mostrada en la figura 4.5.

La antena mostrada en la figura 4.14, es parte del fondo del test de ruido, mientras que en la interfaz primaria, cubre el botón “Medir.”

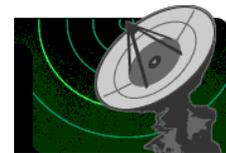


Figura 4.14: Antena de alerta

Finalmente las alertas escritas, disponibles en la figura 4.15, se despliegan en un visor presente en los tres programas, dependiendo de la acción realizada.



Figura 4.15: Alerta escrita en indicador. (a) Mientras el receptor mide. (b) Mientras el motor se mueve.

¹⁸ Todas las señales de alerta que corresponden a imágenes, tienen formato “.GIF”. Esto significa que tienen movimiento de animación. Lo mismo ocurre con la antena de fondo del programa principal, vista en la figura 30; y con los engranajes exhibidos en la figura 32.

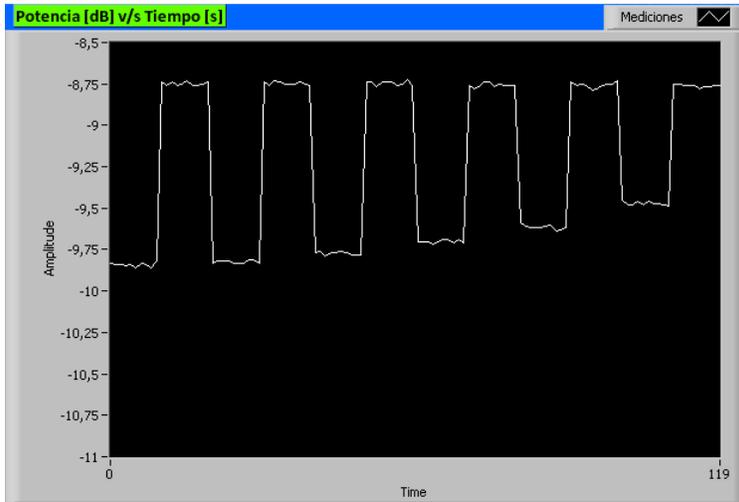


Figura 4.16: Pantalla gráfica

Pantalla Gráfica: Las mediciones efectuadas, tanto en el software inicial, como en el de prueba de temperatura de ruido, se van desplegando en tiempo real, o muy cercano a tiempo real.

El objetivo, como ha sido esbozado en secciones anteriores, es tener un apoyo visual, que permita detectar la existencia de anomalías. Además, en el caso de la figura 4.16, se reconoce el patrón de conducta típico estudiado para la opacidad atmosférica.

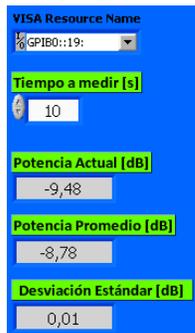


Figura 4.17: Indicadores y controladores

Indicadores y Controladores: En la interfaz basal, existe la posibilidad de manejar algunos parámetros, así como también de observar algunos que no se pueden variar, pero que de todas formas son relevantes.

Se pueden monitorear resultados parciales como la potencia instantánea en una medición, así como también pequeños cálculos como la potencia promedio y la desviación estándar de la medición inmediatamente anterior.

Además, el tiempo de medición es ajustable como se ve en la figura 4.17. A su vez, en el visor expuesto en la figura 4.18, se puede ver cuánto tiempo lleva cada medición, en el caso del programa principal y el test de ruido. En tanto, para el caso de la calibración el citado visor muestra el tiempo que falta para terminar la operación.



Figura 4.18: Indicador de tiempo

Por otra parte, el instrumento con el que se está adquiriendo datos es también variable. Aun cuando para este estudio en particular se usó siempre el mismo medidor de potencia, la idea es desarrollar un programa flexible que sea capaz de asimilar algunas modificaciones logísticas en el futuro, sin quedar obsoleto.

Mediciones

Realizadas:

Considerando, que en el momento de ejecutar las distintas mediciones, se debe estar muy atento a múltiples pormenores de manera simultánea, es de gran utilidad contar con un registro en pantalla de los datos que ya se han tomado.

Este despliegue, el cual se puede apreciar en la figura 4.19, forma parte del programa primario, y a su vez, del software complementario para la medición del ruido del sistema.

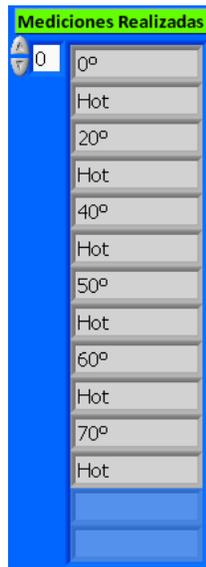


Figura 4.19: Mediciones realizadas

Indicadores

de Resultados: Habiendo finalizado por completo el procedimiento es necesario oprimir el botón "Generar Archivo" para conocer los resultados globales.

El programa, internamente utiliza el programa MatLab, y entrega en pantalla los valores más trascendentes, que como ya se sabe, son: el valor de τ_v y su error; y el porcentaje de transmisión con su consiguiente error. Esto se expone en la figura 4.20.

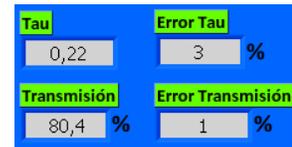


Figura 4.20: Indicadores de resultados

Comentarios y Estado del Cielo:

Para finalizar el estudio, como ha sido mencionado más de una vez, es de gran trascendencia guardar registro de anotaciones que digan relación con el estado del cielo al momento de hacerse el experimento y con el desempeño que demostró tanto el programa como los instrumentos de medición. En Las figuras 4.21 y 4.22, se muestran los cuadros de dialogo desplegados para este efecto.

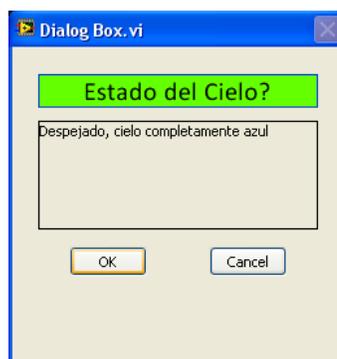


Figura 4.21: Diálogo Estado del Cielo



Figura 4.22: Diálogo Comentarios

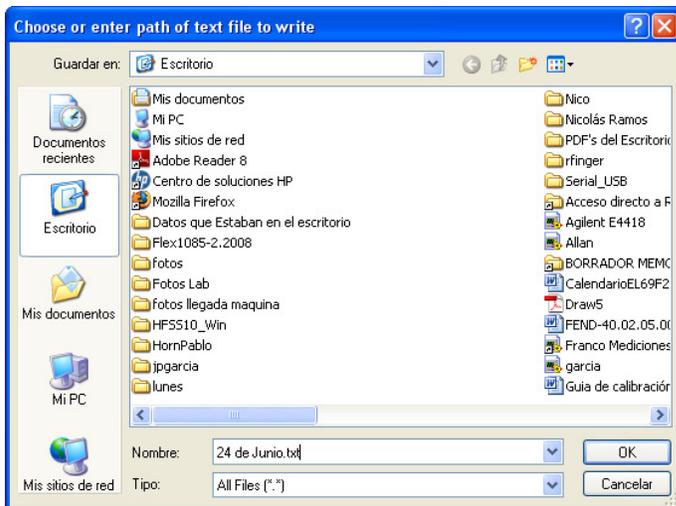


Figura 4.23: Diálogo para nombrar archivo de salida

Nombre de Archivo: A modo de cierre de las funciones del software automático de medición, éste exhibe en pantalla un diálogo exigiendo un nombre para el archivo de salida generado con la síntesis de la información. El citado diálogo corresponde a la figura 4.23.

Cabe destacar que este compendio es un resumen de todos los valores de interés. Destacan en este sentido la potencia de cada medición (rotulada), sus promedios y su desviación estándar; también están las temperaturas de ruido medidas; la hora y fecha; las estimaciones de τ_v y de la transmisión, con sus errores; y, el estado del cielo y comentarios anexos.

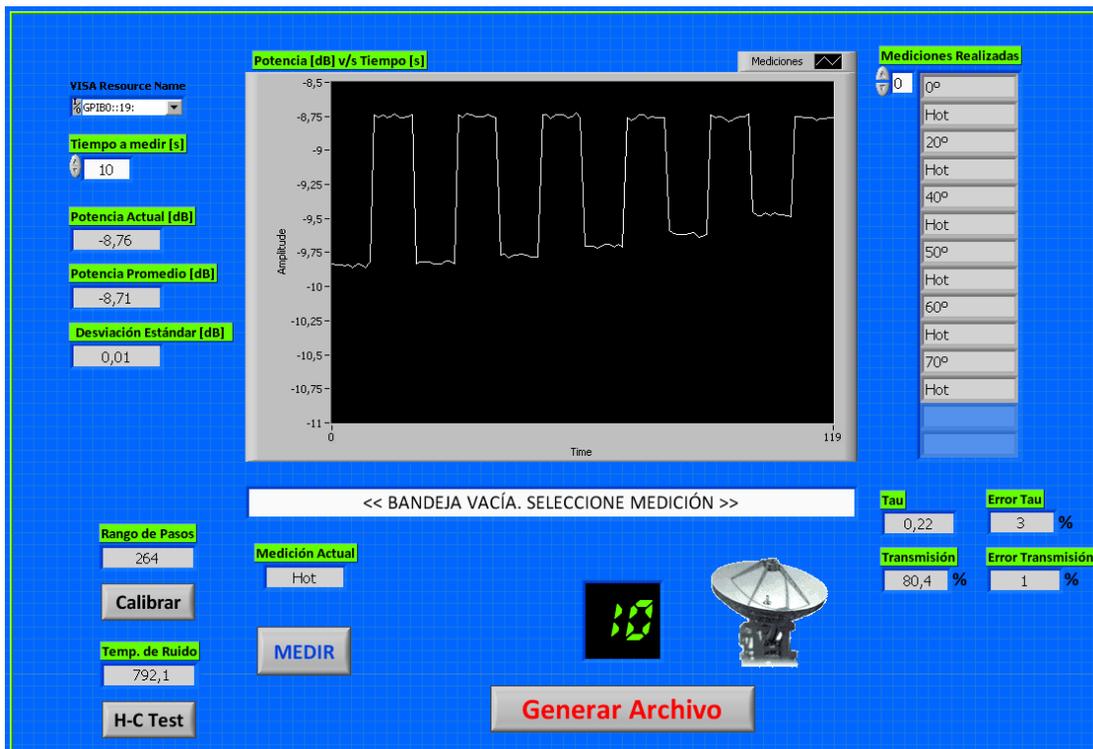


Figura 4.24: Pantalla desplegada una vez finalizado el procedimiento de medición.

Como se ha podido ver en esta sección, el resultado final del software de medición automática corresponde a una herramienta robusta e interactiva que mezcla la complejidad del procedimiento de evaluación de la opacidad atmosférica en el Cerro Calán, con la simplicidad operativa y un interfaz llamativa y eficaz.

Con respecto a los objetivos planteados desde el principio del estudio, en relación a la parte computacional, los frutos de esta labor están a la vista. Se cumplió con todas las metas impuestas al comienzo, siendo los puntos más importantes: que el motor se mueva por sí sólo y logre medir en diferentes ángulos; y, el procesamiento de datos y posterior registro en archivos de texto computacionales de manera completamente automatizada.

Para concluir entonces, en la figura 4.24 se adjunta la imagen que queda en pantalla una vez finalizado el uso del software. Esta interfaz de resumen, se mantiene abierta hasta que la persona encargada lo estime conveniente, en caso de que ésta quiera revisar alguna parte con mayor detención.

Capítulo 5

Conclusiones

El trabajo realizado en esta memoria de título tuvo dos grandes temas a desarrollar. Por una parte, un ciclo de mediciones de opacidad atmosférica a 115[GHz] utilizando el receptor del radiotelescopio 1,2[m] *Southern Millimeter-Wave Telescope* (SMWT); y por otro lado, el diseño e implementación de una plataforma computacional de medición automática, con el receptor en cuestión. En base a estos objetivos, se puede señalar que los resultados fueron exitosos, lográndose a cabalidad las metas impuestas en un principio. Como es lógico, existen detalles que afinar y mejoras por implementar, principalmente en la parte computacional, pues como es sabido, todo software está sujeto a continuas actualizaciones.

Como primera observación hay que remarcar que, al margen de los resultados obtenidos, existía la intención de caracterizar el cielo en el Cerro Calán, labor que fue ejecutada enteramente, lográndose un ciclo de mediciones prácticamente anual, con una base de datos complementarios – como el estado meteorológico del cielo, el horario de medición y la temperatura de ruido del receptor, entre otros – que enriquecen el estudio. En el ámbito del análisis en tanto, se procesaron los datos obtenidos con un modelo de orden cero, con el cual se linealizó el conjunto de puntos medidos en el cielo, pudiéndose conocer los niveles de transmisión atmosférica.

En relación al modelo aplicado, queda en deuda el estudio de la influencia del oxígeno en la transmisión atmosférica obtenida y la búsqueda de más y mejores modelos. Se debe considerar que Cerro Calán (850 metros) no es un lugar tan favorable para la radioastronomía en términos de altura, comparado por ejemplo con Cerro Tololo (2.200 metros), ubicación original del radiotelescopio. Sin embargo, incluso con el modelo básico que se utilizó, se obtuvieron resultados que permiten pronosticar futuras observaciones astronómicas exitosas.

En cuanto a la automatización, se logró un software cuyos frutos están a la vista. Los puntos más importantes son tres. Primero, que el motor se mueve automáticamente en un rango angular invariante en el tiempo de aproximadamente 270°, acotado por sensores de límite de carrera. Segundo, que el

motor se posiciona de manera secuencial, según un itinerario preestablecido, alternando su ubicación entre diferentes ángulos del cielo (0° a 70°) y una carga de calibración. En cada lugar en que el motor se detiene, se usa el receptor para hacer mediciones. Tercero, que los datos obtenidos en el procedimiento, se procesan y registran en un archivo de texto, de manera completamente automática, entregando como resultados cifras de interés como lo son la transmisión atmosférica, con su respectivo valor de τ asociado.

Finalmente, el resultado más importante de la presente memoria es que las mediciones de la transmisión atmosférica obtenidas en Cerro Calán a 115 [GHz] han sido cruciales en la decisión de trasladar el radiotelescopio completo, incluyendo la cúpula, desde Cerro Tololo a Cerro Calán. Esto reviste una gran importancia por cuanto el Observatorio Astronómico Nacional contará, por primera vez, con un radiotelescopio no sólo para hacer investigación – por ejemplo, completar la exploración del cielo austral a 115 [GHz] – sino que también para la docencia (Laboratorio de Radioastronomía) y la extensión.

5.1. Trabajo Futuro

Al momento de terminar esta memoria, ya se encontraban en Cerro Calán las partes complementarias del radiotelescopio SMWT, traídas desde Cerro Tololo. En este marco, se dan algunas recomendaciones de trabajo futuro.

Relacionado a la necesidad de modernizar el sistema de control computacional proveniente de Cerro Tololo, se propone estudiar la compatibilidad del software desarrollado, con el sistema operativo del radiotelescopio. Claramente no se busca preservar los programas como tal (el radiotelescopio necesita de un diseño computacional bastante más complejo), sino los criterios de operación y programación que puedan ser de utilidad en la nueva plataforma.

Además, se sugiere el estudio de modelos más acertados para el análisis de los resultados obtenidos con el receptor. Se podría evaluar la influencia del oxígeno en la transmisión atmosférica obtenida, y del contexto meteorológico en el que se realiza el estudio, con miras a generar un modelo que sea más preciso al momento de estimar los valores de interés. Al finalizar esta memoria existían los primeros contactos y conversaciones informales con personas dedicadas a este tópico.



Referencias

- [1] Dahmen G., "The large scale distribution of molecular gas in the galactic center region from C18O and the nitrogen isotope abundance in the galaxy", Ph. D. Thesis. Universitat Bonn, Alemania, 1995.
- [2] Bronfman L., et al., "A CO survey of the southern MilkyWay - The mean radial distribution of molecular clouds within the solar circle", Astrophysical Journal, Part 1 (ISSN 0004-637X), vol. 324, Jan. 1, 1988, p. 248-266.
- [3] Max-Moerbeck W., "Implementación de un Oscilador Gunn en un Receptor a 115 GHz, para fines Radioastronómicos", Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Electricista. Universidad de Chile, 2005.
- [4] Reyes N., "Integración Física de un Amplificador de Bajo Ruido a un Receptor en 100 [GHz]", Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Electricista. Universidad de Chile, 2006.
- [5] Vásquez C., "Optimización de la Razón Señal a Ruido de un Receptor a 115 [GHz] para Fines Astronómicos", Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Electricista. Universidad de Chile, 2007.
- [6] Motte E., "Retrieval Characterization of a Double Sidedband Radiometer for Simultaneous Observation of Ozone and Carbon Monoxide"
- [7] Rohlfs K. and Wilson T., "Tools for Radio Astronomy", A&A Library, second edition 1990.
- [8] Pozar D., "Microwave Engineering", John Wiley & Sons Inc., third edition 2005
- [9] Collin R., "Foundations for Microwave Engineering", John Wiley & Sons Inc., second edition 2001.
- [10] <http://www.apex-telescope.org> [Consulta noviembre de 2008]
- [11] <http://www.britannica.com/> [Consulta noviembre de 2008]
- [12] <http://mediatheek.thinkquest.nl/~ll125> [Consulta noviembre de 2008]
- [13] <http://www.cientec.or.cr/ciencias> [Consulta noviembre de 2008]
- [14] Kraus J.D., "Radio Astronomy", McGraw-Hill, 1966.
- [15] Donoso J., "Implementación de un Radiotelescopio para la Escuela de Ingeniería y Ciencias", Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Electricista. Universidad de Chile, 2005.
- [16] Spiegel M., "Estadística", McGraw Hill, segunda edición 1991.
- [17] <http://www.conycit.cl> [Consulta junio de 2009]
- [18] <http://www.eccosorb.com> [Consulta junio de 2009]

[19] Horowitz P., Wineld H., "The art of electronics", Cambridge University press, second edition 1989.

[20] Vielma A., "Diseño de un receptor para radioastronomía milimétrica utilizando amplificadores HEMT", Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Electricista. Universidad de Chile, 2006.

Anexo A

Modelo para Estimar el Ruido

Sabiendo el carácter negativo que posee el ruido del sistema, resulta importante calibrar el receptor antes de hacer mediciones – en la práctica no siempre se calibra diariamente, pero es bueno tener un criterio apropiado, o bien, un calendario de calibración asociado – para así conocer la sensibilidad que se está teniendo al momento de medir. Para eso se puede ejecutar el *Hot – Cold Test*, también conocido como *Y – Test*. Esta prueba consiste en tomar medidas de calibración del equipo. En particular, se ejecutan mediciones de una carga caliente y una fría de temperaturas conocidas. Estas mediciones son locales – muy cercanas al receptor mismo – por lo cual sus expresiones son

$$P_{Hot} = A \cdot (T_{Ruido} + T_{Hot}) \approx A \cdot (T_{Ruido} + T_{Amb}) \quad (A.1)$$

$$P_{Cold} = A \cdot (T_{Ruido} + T_{Cold}) \quad (A.2)$$

luego se puede hacer el cociente entre ambas cantidades, quedando

$$\frac{P_{Hot}}{P_{Cold}} = \frac{T_{Ruido} + T_{Hot}}{T_{Ruido} + T_{Cold}} = Y \quad (A.3)$$

a partir de medidas en decibeles normalizados, Y se expresa como sigue

$$Y[mW] = 10^{\left(\frac{(P_{Hot} - P_{Cold})[dBm]}{10}\right)} \quad (A.4)$$

entonces

$$T_{Ruido} = \frac{T_{Hot} - Y \cdot T_{Cold}}{Y - 1} \quad (A.5)$$

Considerando entonces que el nitrógeno está a 77 K, y que la temperatura ambiental promedio es de 293 K, se tiene en primera aproximación que la temperatura de ruido viene dada por

$$T_{Ruido} = \frac{293 - 77 \cdot 10^{\left(\frac{(P_{Hot} - P_{Cold})[dBm]}{10}\right)}}{10^{\left(\frac{(P_{Hot} - P_{Cold})[dBm]}{10}\right)} - 1} \quad (A.6)$$

Anexo B

Modelo para Análisis de Datos

Tomando en cuenta que los datos obtenidos tras las mediciones realizadas con el radiómetro son de muchísima trascendencia, cobra sentido la necesidad de tener modelos asociados que permitan la interpretación de los valores logrados. Es por eso que se procede a explicar cómo linealizar los datos para, con un modelo de orden cero, hilvanar algunas interpretaciones. Es importante comentar que existen modelos de mayor complejidad y precisión, los cuales no son parte del desarrollo de esta memoria. Al momento de finalizar este trabajo de título se dejaron hechos algunos contactos con personas dedicadas a la creación de modelos en este ámbito, para así evaluar la posible inclusión de dichas metodologías de análisis en el futuro.

Como se vio en la sección 3.1.1, las medidas tomadas con el receptor SMWT, se ejecutan apuntando en diferentes ángulos del cielo a partir del cenit (z), convención conocida como “ángulo cenital”, completamente opuesta al “ángulo de elevación” que toma como referencia el suelo. A partir de dicha referencia se realiza un barrido del cielo llegando hasta los 70° . Así pues, una forma simple de considerar esta práctica se exhibe en la figura B.1, en donde se muestra la atmósfera como una capa curva y uniforme adherida a La Tierra sin mayores irregularidades.

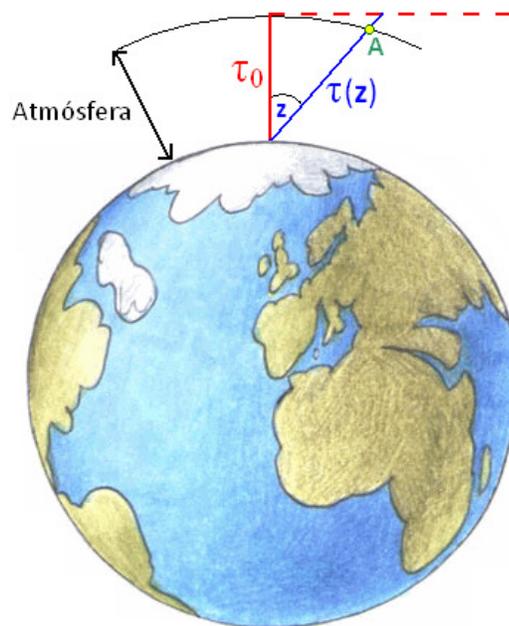


Figura B.1: Modelo simplificado de la atmósfera

Se puede apreciar que τ_0 corresponde a la medida tomada en el Cénit, la cual sirve como referencia para el resto del proceso. Es importante notar que $\tau(z)$ ¹⁹ termina en el arco atmosférico (punto A). Sin embargo, en primera aproximación, se puede pensar que la curvatura del planeta – y consiguientemente de la atmósfera – no es determinante para el desarrollo del método. Bajo ese supuesto, $\tau(z)$ se considera efectiva hasta la proyección de la perpendicular a τ_0 . Haciendo uso del triángulo rectángulo que se forma, se desprende

$$\tau(z) = \frac{\tau_0}{\cos(z)} = \tau_0 \cdot \sec(z) \quad (\text{B.1})$$

Valiéndose de la relación lineal entre la temperatura y la función de Planck – además de la aproximación realizada sobre ésta – en la zona en que es válido el límite de Rayleigh – Jean, tema abordado en la sección 2.2, se puede proponer lo siguiente

$$T_b(\nu) \equiv \frac{\lambda^2}{2k} \cdot I_\nu \quad (\text{B.2})$$

$T_b(\nu)$ es conocida como “temperatura de brillo”, equivalente a la intensidad de radiación pero en unidades de grados Kelvin. La fórmula vista en (B.2) es genérica para cualquier fuente astronómica en observación. Como en este trabajo no se estudia ninguna fuente en particular, la única temperatura que se considera más allá de la atmósfera es la correspondiente a la radiación de fondo cósmico, T_B , descrita en la sección 2.6.2. Resulta necesario entonces, recordar algunas ecuaciones explicitadas en la sección 2.3, como la referente a la intensidad específica (B.3), en donde s es la distancia a lo largo del camino de propagación, y por ende, s_0 corresponde al punto de origen de la señal estudiada. Mediante una adecuada adaptación en la notación, alusiva a los supuestos descritos, se puede expresar la ecuación (B.4).

$$I_\nu(0) = I_\nu(s_0) \cdot e^{-\tau_\nu(s_0)} + \int_0^{s_0} \alpha_\nu \cdot B_\nu(T) \cdot e^{-\tau_\nu(s)} ds \quad (\text{B.3})$$

$$\Rightarrow T_{Sky} = T_B \cdot e^{-\tau_\nu(s_0)} + \int_0^{s_0} \alpha_\nu \cdot T_{Atm} \cdot e^{-\tau_\nu(s)} ds \quad (\text{B.4})$$

Aplicando esto a las mediciones de opacidad atmosférica del Cerro Calán, reconociendo además la existencia de un ruido inherente a los equipos electrónicos y a la interferencia del medio, como por ejemplo, la presencia de antenas aledañas o estructuras que se interpongan en la línea de medición, (B.4) queda de la siguiente forma

$$T_{Sky}(z) = T_{Ruido} + T(z) \quad (\text{B.5})$$

¹⁹ Es importante tener en mente que $\tau(z)$ depende de la frecuencia ν en la cual se está midiendo. De ahora en adelante se hará referencia a $\tau(z)$ y $\tau_\nu(z)$ de manera indistinta.

Ahora, recapitulando la sección 2.3, se expone la solución particular para el caso en que hay temperatura constante en el medio estudiado, en este caso la atmósfera

$$I_v^{Out} = I_v^{In} \cdot e^{-\tau_v} + B_v(T)(1 - e^{-\tau_v}) \quad (B.6)$$

Luego, ya que se asume que la atmósfera está a temperatura ambiente a nivel superficial, se puede expresar (B.7). Es importante destacar que dicha ecuación corresponde a la solución de (B.4) para los distintos ángulos de medición. En cada caso lo que cambiará será el límite de integración, por variar el grosor de atmosfera que se debe estudiar. Luego, basándose en lo descrito en la figura B.1, es que las exponenciales ahora están evaluadas en función de z , lo que implica que se está considerando solamente la atmósfera, pues el origen de las señales se modela como proveniente de una distancia equivalente al grosor atmosférico (más adelante se explica por qué se desprecia T_B).

$$T_{Sky}(z) = T_{Ruido} + T_B \cdot e^{-\tau_v(z)} + T_{Atm} \cdot (1 - e^{-\tau_v(z)}) \quad (B.7)$$

Ahora, tomando en cuenta que los equipos utilizados miden potencia, es bueno acondicionar esta fórmula para que quede expresada en unidades adecuadas. Esto es:

$$P_{Sky}(z) = P_{Ruido} + P(z) = A \cdot T_{Ruido} + A \cdot T(z) \quad (B.8)$$

$$\Rightarrow P_{Sky}(z) = A \cdot [T_{Ruido} + T_B \cdot e^{-\tau(z)} + T_{Atm} \cdot (1 - e^{-\tau(z)})] \quad (B.9)$$

Es relevante acotar que la constante A , depende del receptor que se esté utilizando y está dada por la calidad de la electrónica, el tipo de antena, la constante de Boltzman y el ancho de banda del sistema entre otros [8]. Luego, no se puede analizar mediante este modelo, las potencias tomadas con un segundo equipo en base al conocimiento del primero

Se tiene también una carga de referencia, tomada a partir de la temperatura ambiente promedio, la cual se ve dada por

$$P_{Hot} = A \cdot (T_{Ruido} + T_{Hot}) \approx A \cdot (T_{Ruido} + T_{Amb}) \quad (B.10)$$

Como ya fue señalado, se considera la temperatura atmosférica equivalente a la temperatura ambiental, medida localmente a nivel del suelo, equivalente a unos 300 K. Esta aproximación resulta adecuada en primer orden, considerando que en la capa atmosférica más cercana a la tierra, la temperatura disminuye conforme se aumenta la altura, lo cual favorece las mediciones (a nivel del suelo se tiene el peor caso). Además, se tiene que la temperatura de fondo cósmico es de alrededor de 3 K, lo cual hace despreciable las contribuciones no atmosféricas, por tratarse de menos de un 1%. Así pues, restando las ecuaciones (B.10) y (B.9), se obtiene

$$P_{Hot} - P_{Sky}(z) = A \cdot T_{Amb} \cdot e^{-\tau(z)} \quad (B.11)$$

Con el fin de linealizar, se aplica logaritmo natural a la expresión, quedando

$$\ln(P_{Hot} - P_{Sky}(z)) = \ln(A \cdot T_{Amb}) + \tau(z) \quad (B.12)$$

Finalmente, se obtiene como resultado una recta cuya variable independiente es la secante del ángulo de medición en el cielo – en concordancia con lo mostrado en (B.1) – mientras que la variable dependiente corresponde al logaritmo de la diferencia de potencias, entre la medición del cielo (a un determinado ángulo) y la potencia de referencia. Se explicita la fórmula a continuación

$$\ln(\Delta P) = C + \tau_0 \cdot \sec(z) \quad (B.13)$$

La ecuación anterior corresponde a una regresión lineal que estima la recta que mejor representa al conjunto de puntos dado por el gráfico $\sec(z)$ versus $\ln(\Delta P)$, que se esperaría fuese lo más cercana a una recta. Sin embargo, τ_0 no es conocido, al igual que la constante C . Para estimar dichos valores, se debe usar la ecuación de la recta, en donde se tiene

$$y = C + \tau_0 \cdot x \quad (B.14)$$

la manera de obtener C y τ_0 viene dada por las fórmulas (B.15) y (B.16)

$$C = \frac{N \sum_{i=1}^N x_i y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2} \quad (B.15)$$

$$\tau_0 = \frac{\sum_{i=1}^N x_i^2 \sum_{i=1}^N y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N x_i y_i}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2} \quad (B.16)$$

Así pues, por tratarse de la estimación de una recta en base a una curva que no lo es, existen errores asociados a este procedimiento. Para calcular numéricamente dichas desviaciones, se utiliza

$$\Delta C = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \tau_0 x_i - C)^2}{(N-2) \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (B.17)$$

$$\Delta \tau_0 = \left[\left(\frac{1}{N} + \frac{\bar{x}^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \right) \left(\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \tau_0 x_i - C)^2}{(N-2)} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (B.18)$$

Una vez calculados los parámetros de interés, la transmisión cenital (TC) del cielo viene dada por la expresión

$$TC = e^{-\tau_0} \quad (B.19)$$

mientras que el error relativo a dicha transmisión se estima usando el error típico de la regresión lineal, descrito en este anexo como ΔR . Esto es, el error del valor de y previsto para cada x de la regresión. En

otras palabras, el error típico es una medida de la cuantía de error en el pronóstico del valor de y para un valor individual de x , y su expresión viene dada por

$$\Delta R = \left[\frac{1}{(N-2)} \cdot \left(\sum (y - \bar{y})^2 - \frac{(\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y}))^2}{\sum (x - \bar{x})^2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{B.21})$$

Así pues, se puede finalmente evaluar el error porcentual de τ y el error porcentual global del procedimiento, mediante las fórmulas

$$\Delta \tau \% = \frac{\Delta \tau}{\tau} \cdot 100 \quad (\text{B.22})$$

$$\Delta TC \% = \Delta R \cdot TC \cdot 100 \quad (\text{B.23})$$

Anexo C

Programación y Conexión del Motor

Se procede a exponer la documentación existente acerca de la sencilla programación del controlador PIC presente en el circuito externo que maneja el motor paso a paso. Este documento fue realizado por Jorge Castillo, alumno de doctorado del departamento, quién desarrolló esta aplicación.

```
Baud rate 9600
8 bit
sin paridad (none)
1 bit de parada
sin control de flujo
Se resume como 9600-8-N-1

dos comandos

[#comando][ve]locidad, posicion final]
comando 0=calibrar
comando 1=ir a
listo
[0][11,111]
numero de pasos:363
[1][30,200]
200 ok

Mejor sería:

*IDN? Motor de Paso, 2008
*TST? 0 o 1
CAL
Pasos? 78
IR:56
Volt:A? (Voltaje en puerto A)
```

Además el motor se comunica con el circuito externo, mediante un conector, el cual se vio físicamente en la figura 3.2. La disposición de cables adecuada se muestra en la figura C.1.

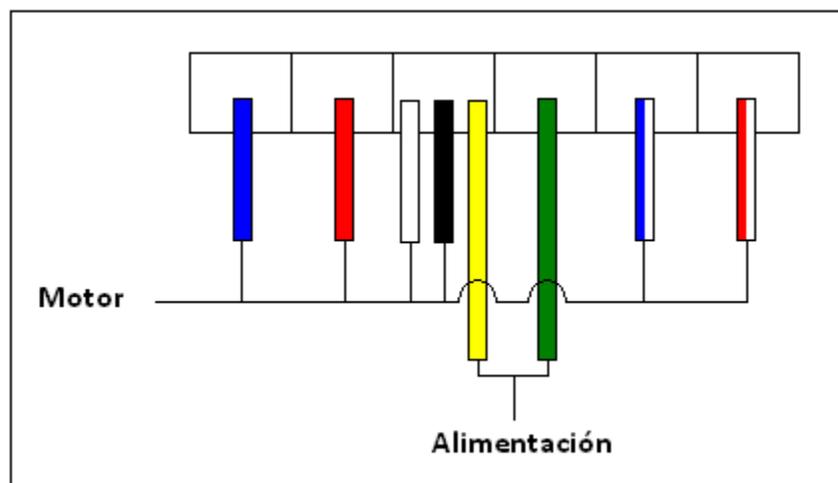


Figura C.1: Conexión del motor a circuito externo

Anexo D

Procedimiento de Encendido y Medición con el Receptor

Se adjunta el instructivo utilizado para poner en funcionamiento el receptor. En este documento se pueden ver imágenes de las principales piezas del sistema, de forma que sea sencillo el reconocimiento de cada parte que se deba manipular.

Procedimiento para medir con Radiómetro en 115 GHz

Pasos Previos

- Enchufar el sistema a la corriente (generalmente con alargador)



- Encender ambos *power meter* (Receptor y Oscilador local)



- Conectar GPIB a puerto USB del computador



- Conectar puerto serial del motor a puerto USB del computador



- Verificar el funcionamiento de Agilent I/O. Comprobar conexión de GPIB0::19::INSTR

- Abrir Programa "*Mediciones Receptor en 115 GHz.vi*" con LabView. Verificar que esté en uso el instrumento GPIB0::19::INSTR

- Encender multímetro en función de grados Celsius



- Encender motor



- Verificar ubicación de carga caliente (en 270°)
- Esperar hasta que *power meter* O.L. esté estable (Deje de cambiar de valor)

Encendido del Receptor

- Llevar a cero el *power meter* O.L.

- Sacar corto circuito del *mixer*



- Encender el oscilador Gunn



- Polarizar el *mixer* hasta que haya corriente 0,2 [mA]



- Abrir atenuador RF hasta que el *power meter* (OL) marque 0,2 [mW], o bien, haya corriente de 0,5 [mA] en el *mixer*



- En caso de irregularidades, chequear el *Resonant Ring*.



Mediciones

- Usar programa “*Mediciones Receptor en 115 GHz.vi*”
- Presionar “*Calibrar*”. Esperar que se ejecute. Presionar “*Salir*” en ventana emergente.
- **SÓLO SI HAY NITRÓGENO**, presionar “*HC – Test*”. Esperar que mida carga caliente
- Poner recipiente con nitrógeno bajo el espejo y presionar “*Aceptar*” en ventana emergente.
- Escribir “*Comentarios*” si es que existen.



- Guardar archivos como "*HC (fecha).txt*". Ventana emergente se cerrará. Quitar nitrógeno
- Presionar "*Medir*". Se tomarán datos en los siguientes ángulos: 0°, 20°, 40°, 50°, 60°, 70°. Se intercalará con mediciones de carga caliente (270°). Vigilar que espejo se pose en ángulo correcto.
- Presionar "*Test*". Repetir el proceso anterior y guardar archivo como "*HC2(fecha).txt*"
- Presionar "*Generar Archivo*". Escribir "*Estado del cielo*". Escribir "*Comentarios*". Se obtendrán resultados numéricos de "*Transmisión*" y "*Tau*" con sus respectivos errores. Guardar archivo generado como "*(Fecha).txt*"
- Presionar "*PrtScr*" en el TECLADO y pegar la foto en "*Paint*". Guardar como "*(fecha).bmp*"

(En caso de errores que ameriten la repetición del proceso se debe cerrar el programa y abrirlo otra vez antes de realizar segunda medición)

Apagado del Receptor

- Apagar atenuador RF
- Llevar voltaje del *mixer* a 0[V]
- Apagar oscilador Gunn
- Poner corto circuito en el *mixer*
- Apagar ambos *power meter*
- Apagar el motor
- Desconectar GPIB y puerto USB del motor
- Apagar multímetro
- Desenchufar sistema de la corriente.

Anexo E

Archivo de Salida Software de Medición de Opacidad Atmosférica

Se muestra a continuación un archivo de salida generado por el programa automático de medición, para exhibir el formato y la información que éste entrega.

Mediciones Radiómetro en 115 [GHz]

18-06-2009

Hora de Inicio: 10:03

0

> Valores: -9,79 -9,79 -9,80 -9,78 -9,79 -9,79 -9,78 -9,80 -9,76 -9,78

> Potencia Promedio: -9,79

> Desviación Estándar: 0,01

Hot

> Valores: -8,70 -8,69 -8,71 -8,72 -8,72 -8,72 -8,71 -8,71 -8,70 -8,71

> Potencia Promedio: -8,71

> Desviación Estándar: 0,01

20

> Valores: -9,77 -9,77 -9,78 -9,76 -9,76 -9,77 -9,76 -9,76 -9,77 -9,77

> Potencia Promedio: -9,77

> Desviación Estándar: 0,01

Hot

> Valores: -8,72 -8,71 -8,71 -8,71 -8,70 -8,73 -8,72 -8,71 -8,72 -8,73

> Potencia Promedio: -8,72

> Desviación Estándar: 0,01

40

> Valores: -9,71 -9,73 -9,71 -9,71 -9,71 -9,71 -9,67 -9,70 -9,73 -9,71
> Potencia Promedio: -9,71
> Desviación Estándar: 0,02

Hot

> Valores: -8,72 -8,71 -8,72 -8,71 -8,69 -8,72 -8,72 -8,71 -8,71 -8,72
> Potencia Promedio: -8,71
> Desviación Estándar: 0,01

50

> Valores: -9,64 -9,64 -9,62 -9,63 -9,62 -9,61 -9,61 -9,65 -9,65 -9,66
> Potencia Promedio: -9,63
> Desviación Estándar: 0,02

Hot

> Valores: -8,71 -8,69 -8,71 -8,73 -8,71 -8,70 -8,70 -8,71 -8,71 -8,73
> Potencia Promedio: -8,71
> Desviación Estándar: 0,01

60

> Valores: -9,53 -9,53 -9,55 -9,56 -9,53 -9,56 -9,53 -9,56 -9,54 -9,54
> Potencia Promedio: -9,54
> Desviación Estándar: 0,01

Hot

> Valores: -8,70 -8,73 -8,72 -8,71 -8,70 -8,75 -8,69 -8,72 -8,73 -8,71
> Potencia Promedio: -8,72
> Desviación Estándar: 0,02

70

> Valores: -9,42 -9,41 -9,42 -9,39 -9,41 -9,39 -9,41 -9,42 -9,42 -9,38
> Potencia Promedio: -9,41
> Desviación Estándar: 0,01

Hot

> Valores: -8,73 -8,71 -8,73 -8,72 -8,74 -8,73 -8,73 -8,71 -8,75 -8,72

> Potencia Promedio: -8,73

> Desviación Estándar: 0,01

Tau: 0,22

Error en Tau: 3 %

Trasmisión: 80,4 %

Error en Trasmisión: 1 %

Hot - Cold Test:

HC 1 10:05 792,1 K

HC 2 10:08 790,2 K

Hora de Término: 10:09

Estado del Cielo: Despejado, cielo completamente azul. 13 Grados

Comentarios: Revisar calibración de ángulos

Anexo F

Hoja de Datos del *Limit Switch*

HOA1180

Reflective Sensor

FEATURES

- Choice of phototransistor or photodarlington output
- High sensitivity
- Wide operating temperature range (-55°C to +100°C)
- 12.0 in.(305 mm) min. 28 AWG PVC insulated wire leads



INFRA-24.TIF

DESCRIPTION

The HOA1180 series consists of an infrared emitting diode and an NPN silicon phototransistor (HOA1180-001, -002) or photodarlington (HOA1180-003), encased side-by-side on converging optical axes in a black thermoplastic housing. The detector responds to radiation from the IRED only when a reflective object passes within its field of view. The HOA1180 series employs metal can packaged components. For additional component information see SE1450, SD1440, and SD1410.

Housing material is polyester. Housings are soluble in chlorinated hydrocarbons and ketones. Recommended cleaning agents are methanol and isopropanol.

Wire color code and functions are:

All devices

- IRED anode - Red
- IRED cathode - Black

HOA1180-001

- Collector - Brown
- Emitter - Black

HOA1180-002

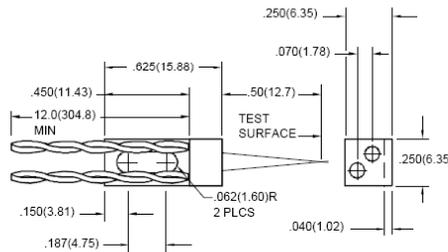
- Collector - Orange
- Emitter - Black

HOA1180-003

- Collector - Yellow
- Emitter - Black

OUTLINE DIMENSIONS in inches (mm)

Tolerance	3 plc decimals	±0.010(0.25)
	2 plc decimals	±0.020(0.51)



DIM_095.ds4

HOA1180

Reflective Sensor

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (25°C unless otherwise noted)

PARAMETER	SYMBOL	MIN	TYP	MAX	UNITS	TEST CONDITIONS
IR EMITTER						
Forward Voltage	V_F			1.6	V	$I_F=20\text{ mA}$
Reverse Leakage Current	I_R			10	μA	$V_R=3\text{ V}$
DETECTOR						
Collector-Emitter Breakdown Voltage HOA1180-001, -002 HOA1180-003	$V_{(BR)CEO}$	30 15			V	$I_C=100\ \mu\text{A}$
Emitter-Collector Breakdown Voltage	$V_{(BR)ECO}$	5.0			V	$I_E=100\ \mu\text{A}$
Collector Dark Current HOA1180-001, -002 HOA1180-003	I_{CED}			100 250	nA	$V_{CE}=10\text{ V}$ $I_F=0$
COUPLED CHARACTERISTICS						
On-State Collector Current HOA1180-001 HOA1180-002 HOA1180-003	$I_{C(ON)}$	0.04 0.16 2.0			mA	$V_{CE}=5\text{ V}$ $I_F=30\text{ mA}$ (1)
Collector-Emitter Saturation Voltage HOA1180-001 HOA1180-002 HOA1180-003	$V_{CE(sAT)}$			0.4 0.4 1.1	V	$I_F=30\text{ mA}$ (1) $I_C=5\ \mu\text{A}$ $I_C=20\ \mu\text{A}$ $I_C=250\ \mu\text{A}$
Rise And Fall Time HOA1180-001, -002 HOA1180-003	t_r, t_f		15 75		μs	$V_{CC}=5\text{ V}, I_C=1\text{ mA}$ $R_L=1000\ \Omega$ $R_L=100\ \Omega$

Notes

1. Test surface is a front surface mirror (polished aluminum, 85% reflectance) located 0.50 in.(12.7 mm) from the front surfaces of the device.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

(25°C Free-Air Temperature unless otherwise noted)

Operating Temperature Range	-55°C to 100°C
Storage Temperature Range	-55°C to 125°C
Soldering Temperature (5 sec)	240°C

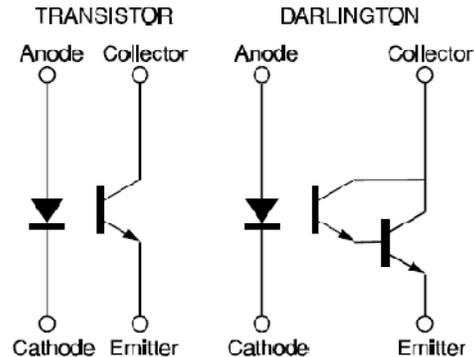
IR EMITTER

Power Dissipation	75 mW (1)
Reverse Voltage	3 V
Continuous Forward Current	50 mA

DETECTOR

	TRANS.	DARLINGTON
Collector-Emitter Voltage	30 V	15 V
Emitter-Collector Voltage	5 V	5 V
Power Dissipation	75 mW (1)	75 mW (1)
Collector DC Current	30 mA	30 mA

SCHEMATIC



Honeywell reserves the right to make changes in order to improve design and supply the best products possible.

Honeywell

237

HOA1180

Reflective Sensor

Fig. 1 IRED Forward Bias Characteristics

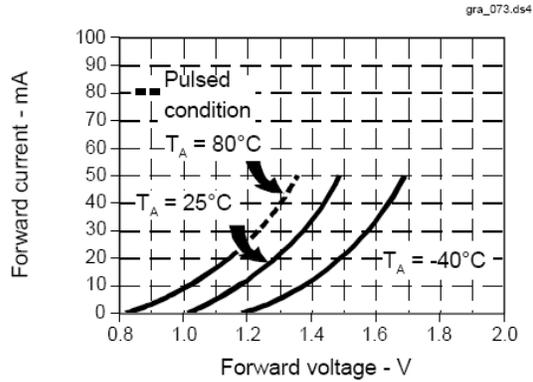


Fig. 2 Non-Saturated Switching Time vs Load Resistance

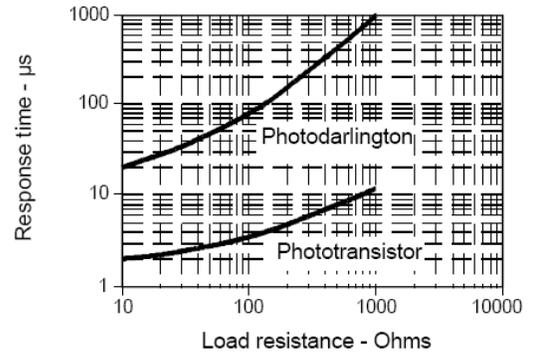


Fig. 3 Dark Current vs Temperature

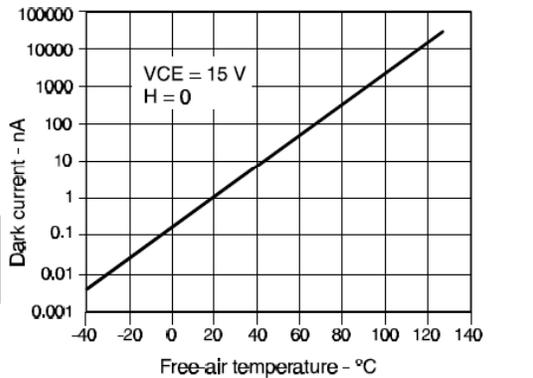


Fig. 4 Collector Current vs Ambient Temperature

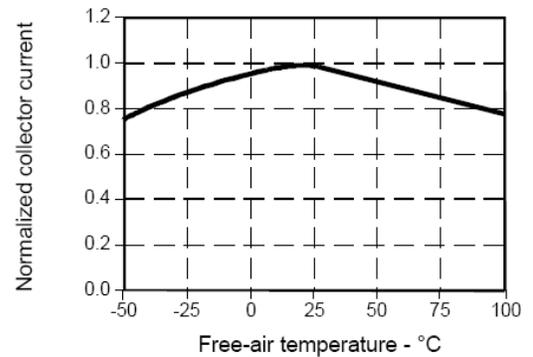


Fig. 5 Collector Current vs Distance to Reflective Surface

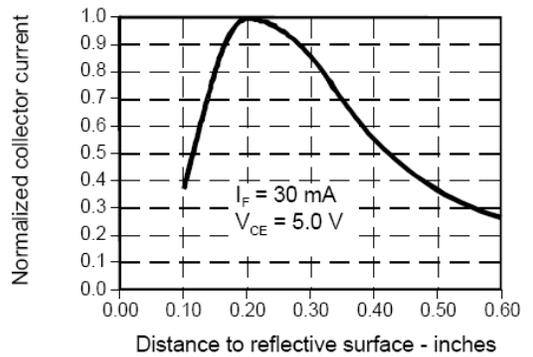
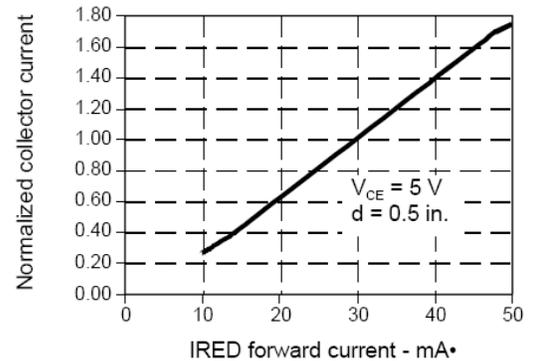


Fig. 6 Collector Current vs IRED Forward Current



All Performance Curves Show Typical Values

Anexo G

Calibración Ángulo de Espejo – Paso de Motor

En la tabla G.1 se muestra la correspondencia entre los ángulo de interés de medición en el cielo y el consiguiente paso en el motor de control. Es importante entender que esta distribución está íntimamente ligada con la ubicación física de los sensores de límite de rango. Por este motivo, se exponen los valores obtenidos al momento de la última calibración, sabiendo que pueden diferir en un par de grados con el tiempo, dada el eventual movimiento de los sensores, posibles debido a la vibración del motor entre otros. Por esta razón resulta crucial tener un buen monitoreo del desempeño del sistema además de llevar a cabo periódicas calibraciones para asegurar un óptimo funcionamiento.

Ángulo del Espejo	Paso del Motor
0°	115
20°	135
40°	155
50°	165
60°	175
70°	185
149° (Carga Fría)	264
270° (Carga Caliente)	25

Tabla G.1: Relación entre ángulo del espejo y paso del motor

Es importante para el buen funcionamiento del equipo, estar constantemente revisando que esta relación se cumpla. En caso contrario, se debe proceder a calibrar nuevamente el sistema, siendo en general la causa de errores la disposición de los sensores. Estos últimos están atornillados en una plataforma metálica, sin embargo dadas las vibraciones asociadas a la operación del motor, después de cierto tiempo pueden diferir en unos pocos grados de su alineación original.

En este sentido es importante comentar que se prefirió no aplicar pegamentos de ningún tipo en la fijación de los sensores. Las razones principales por las que se tomó esta decisión consisten por un lado, en las dimensiones físicas de los dispositivos que ponen en riesgo su funcionamiento en caso de contacto con algún químico; y por otro, en la necesidad imperiosa de mantener el emisor láser lo más limpio y despejado que se pueda.

Anexo H

Códigos de MatLab Implementados en LabView

Se muestra a continuación los algoritmos usados en el cálculo de la temperatura de ruido y en la transmisión del cielo, con el tau asociado a dicho procedimiento.

Hot Cold Test:

```
HC=(293 - 77*10^((hc(1)-hc(2))/10))/((10^((hc(1)-hc(2))/10))-1)

cantidadHC=cantidadHC+1;
HCfinal(cantidadHC) =HC;
reloj=clock;
HChora(cantidadHC) =reloj(4);
HCmin(cantidadHC) =reloj(5);
numero=num2str(cantidadHC);
```

Programa Principal:

Recibe un arreglo en que cada dato fue convertido a [dbm] con:

```
y =10^(x/10)
```

Luego, se ejecutan las siguientes instrucciones:

```
i=1;j=1;RES=[];N=6;
sec=[1.00000000000000;1.06410925122056;1.30501981062991;1.55490417714412;1.998162932926
26;2.91883799667182];

while j<=(numel(A)/2),
    f= A(i+1)-A(i);
    res= log(abs(f));
    RES(j)=res;
    j=j+1;
    i= i+2;
end

RES= RES';

Tau =abs((((N*sum(sec.*RES))-(sum(sec)*sum(RES)))/(N*sum(sec.^2)-(sum(sec))^2)))

ErrorTip= ((1/(N*(N-2)))*((N*sum(RES.^2)-(sum(RES))^2)-((((N*sum(sec.*RES))-
(sum(sec)*sum(RES))^2)/(N*sum(sec.^2)-(sum(sec))^2))))^0.5)

Tx=exp(-Tau)*100
```

ErrorTx=ErrorTip*Tx

xbarra=sum(sec)/numel(sec);

intereje= (sum(sec.^2)*sum(RES)-sum(sec)*sum(sec.*RES))/(N*sum(sec.^2)-(sum(sec))^2);

ErrorTau= (((sum((RES+Tau*sec-intereje).^2))/((N-2)*sum((sec-xbarra).^2)))^0.5)/abs(Tau)*100

HChora

HCmin

HCfinal

cantidadHC