



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE INGENIERÍA



Reconversión de antenas de telecomunicaciones en desuso en radiotelescopios: desafíos y posibilidades científicas.

TESIS PRESENTADA A LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA POR

Manuel Caldas

EN CUMPLIMIENTO PARCIAL DE LOS REQUERIMIENTOS
PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
DOCTOR EN INGENIERÍA FÍSICA.

DIRECTORES DE TESIS

Gonzalo Tancredi..... Universidad de la República
Stan Kurtz..... Universidad Nacional Autónoma de México

TRIBUNAL

Dr. Arturo Gómez (Revisor Externo)..... Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE, México).
Dr. Germán Chaparro (Revisor Externo) Universidad de Antioquia (Colombia).
Dr. Sebastián Bruzzone Universidad de la República
Dr. Pablo Belzarena..... Universidad de la República

DIRECTOR ACADÉMICO

Federico La Rocca..... Universidad de la República

Montevideo
miércoles 11 diciembre, 2024

Reconversión de antenas de telecomunicaciones en desuso en radiotelescopios: desafíos y posibilidades científicas., Manuel Caldas.

ISSN 1688-2784

Esta tesis fue preparada en L^AT_EX usando la clase iietesis (v1.1).

Contiene un total de 180 páginas.

Compilada el miércoles 11 diciembre, 2024.

<http://iie.fing.edu.uy/>



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA



ACTA DE DEFENSA

TESIS DE DOCTORADO EN INGENIERÍA FÍSICA

Fecha: 21.11.24

Lugar: Montevideo, Facultad de Ingeniería – Universidad de la República

Plan de Estudio: Doctorado en Ingeniería Física

Aspirante: Juan Manuel Caldas Zeballos

Documento de Identidad: 4.286.310-7

Director/es de Tesis: Dr. Gonzalo Tancredi y Dr. Stan Kurtz

Tribunal: Dr. Arturo Iván Gómez Ruiz
Dr. Germán Chaparro
Dr. Sebastián Bruzzone
Dr. Pablo Belzarena

Revisores: Dr. Arturo Iván Gómez Ruiz
Dr. Germán Chaparro

Los miembros del Tribunal hacen constar que en el día de la fecha el **Mag. Ing. Juan Manuel Caldas Zeballos** ha sido **APROBADO** en la defensa de su **Tesis de Doctorado en Ingeniería Física** titulada: **“Reconversión de antenas de telecomunicaciones en desuso en radiotelescopios: desafíos y posibilidades científicas.”**.

La resolución del Tribunal se fundamenta en los puntos detallados a continuación:

Las aportaciones principales de esta tesis en ingeniería tienen que ver con la evaluación técnica sobre la posibilidad de la reconversión de antenas de telecomunicaciones para uso radioastronómico, dividiendo esta en los aspectos fundamentales para el funcionamiento de la antena: infraestructura disponible, interferencia en radiofrecuencia, receptores y modelo de apuntado.

En particular se destaca el desarrollo del sistema de apuntamiento y la construcción de un radiómetro para la caracterización y mitigación de la interferencia radioeléctrica (RFI), lo cual es de gran importancia para la calidad de los datos científicos recogidos por antenas reconvertidas.



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA



Finalmente, el candidato cierra su tesis con un trabajo de análisis de datos radioastronómicos obtenidos con uno de los radiotelescopios más avanzados del mundo, el GBT. El estudio se basa en el análisis de emisión molecular de estrellas masivas en formación.

El documento de tesis es muy completo y valioso para sentar las bases del desarrollo de esta disciplina en Uruguay y en otros países latinoamericanos. En cada capítulo se describe en detalle el trabajo realizado por el estudiante y el equipo de trabajo, así como las conclusiones de la evaluación en cada uno de estos aspectos.

La presentación oral del candidato fue muy buena, respondiendo de manera precisa a las preguntas del tribunal.

Para que conste,

Dr. Arturo Iván Gómez Ruiz

Dr. Germán Chaparro

Dr. Sebastián Bruzzone

Dr. Pablo Belzarena

Esta luz es un hogar; ese hogar es una estrella; esa estrella, un sol; ese sol, un universo; ese universo, la nada. Todo número es cero ante el infinito.

VÍCTOR HUGO, *Los trabajadores del mar*.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Agradecimientos

El camino iniciado hace 5 años no habría podido llegar a su fin, que es la presente tesis, de no haber sido por el apoyo, orientación, sugerencias, ideas, o aliento recibidos por un número de personas que, felizmente, es muy grande.

Deseo empezar por mi familia, Marco, Pilar, Florencia, mis padres Exequiel y Cristina, y mis queridos hermanos y hermana.

En lo académico, aunque no se circunscribe a ello mi agradecimiento, agradezco a mis tutores Stan Kurtz y Gonzalo Tancredi. Quiero destacar particularmente el rol de Stan durante este trabajo, su orientación clara, su permanente disponibilidad, y por supuesto hospitalidad durante mis estancias en el Instituto de Radioastronomía y Astrofísica (IRyA) de la UNAM en Morelia (Michoacán). Del IRyA también quiero destacar el soporte y la amabilidad de Gilberto Zavala, quien posibilitó el trabajo remoto desde Montevideo con los datos alojados en IRyA.

Esta tesis no habría sido posible tampoco sin el apoyo de ANTEL, y muy particularmente del personal técnico de la Estación Terrena de Manga: Javier, Martín, Diego, Emiliano, Néstor, Ricardo y Jorge (QEPD).

Quiero destacar también el apoyo financiero recibido por la Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC) de la Universidad de la República, que a través de sus Becas MIA financió mis estancias en IRyA. Asimismo, resaltar el apoyo de la Asociación de Docentes de la Universidad de la República (ADUR)-Facultad de Ciencias, por la financiación recibida para equipamiento, así como de PEDECIBA-Física.

Finalmente, a mis compañeros y compañeras de oficina en el Departamento de Astronomía de la Facultad de Ciencias (Nicolás, Lucía, Valeria, Álvaro) por su entusiasmo alentador con los resultados que se iban obteniendo en el transcurso de esta tesis.

A todos ellos mis más sinceros y eternos agradecimientos.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

A Marco.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Resumen

En la última década y media se ha emprendido en distintas partes del globo la reconversión de antenas de gran porte, diseñadas y operadas en su momento para comunicaciones satelitales y hoy en desuso, en radiotelescopios.

Estos proyectos han permitido a grupos e instituciones que tradicionalmente no tenían acceso a la financiación que requiere un radiotelescopio “llave en mano”, emprender un proyecto de reconversión y disponer así de un instrumento científico con el que realizar ciencia de frontera, por una inversión relativamente baja. Algunas experiencias muestran además el impacto que estos proyectos han tenido en la formación de capacidades locales, que posibilitan abrir nuevas líneas de investigación científica en sus países.

La presente tesis describe un conjunto de actividades que constituyen las primeras acciones de desarrollo de la radioastronomía profesional en el país. Los principales desafíos técnicos vinculados a la reconversión de estas antenas en un instrumento científico como lo es un radiotelescopio, son descritos y planteadas diferentes soluciones. En particular, el desafío que supone el creciente despliegue de servicios que desde el punto de vista radioastronómico constituyen fuentes de interferencia, y las acciones de caracterización y mitigación que pueden abordarse para paliar sus efectos en datos de ciencia, son descritos en detalle.

El diseño, construcción, validación y puesta en operación de un radiómetro que permite, en estadios incipientes de desarrollo de proyectos de reconversión, realizar actividades de caracterización del sistema en su conjunto (óptica, receptores, backends) a un bajo coste, es descrito en profundidad. En particular, se describe cómo fue utilizado este radiómetro para obtener el modelo de apuntamiento de una antena, y tránsitos de la Luna y el Sol, que constituyen de las pocas detecciones radioastronómicas en el país realizadas en el marco de una investigación académica. Estas detecciones se suman al trabajo pionero desarrollado por el grupo liderado por el Dr. Félix Cernuschi con el radiointerferómetro del Aeropuerto de Carrasco en la segunda mitad de los '60 ([Cernuschi et al., 1968]).

Finalmente, se describe los resultados obtenidos a partir de datos espectrométricos crudos obtenidos en un relevamiento de once fuentes que albergan núcleos moleculares calientes, que son regiones de formación estelar masiva. Los datos fueron obtenidos con el Green Bank Telescope en 2011, por parte de un grupo liderado por el co-orientador de la presente tesis. Estos datos no habían sido previamente reducidos ni analizados, sino hasta lo desarrollado en el marco de la presente tesis. El análisis permite realizar una datación de las fuentes, combinando las transiciones moleculares detectadas de cianopolinas y moléculas sulfuradas, con modelos químicos disponibles.

Palabras Clave: radioastronomía, formación estelar, software-defined radio, astroquímica.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Tabla de contenidos

Acta de Defensa	iii
Agradecimientos	v
Resumen	ix
1. Introducción	1
1.1. Motivación y contexto	1
1.2. Taller en Ghana: los desafíos técnicos	3
1.2.1. Sistema de apuntamiento y control	4
1.2.2. Óptica	4
1.2.3. <i>Feedhorn</i> y receptor	6
1.3. Taller en Ciudad de Mexico: redes VLBI	8
1.4. Taller en Goonhilly: impacto socioeconómico	10
1.5. Estructura del documento	11
2. Fundamentos de radioastronomía: teoría e instrumentación	13
2.1. Radioastrofísica	13
2.1.1. Energía emitida	14
2.1.2. Ecuación de transferencia radiativa	15
2.1.3. Continuo de radio	16
2.1.4. Líneas espectrales	19
2.1.5. Método de diagramas rotacionales	29
2.1.6. Densidad columnar en LTE	29
2.1.7. Máseres	30
2.2. Instrumentos	31
2.2.1. Antenas	31
2.2.2. Receptores	35
2.2.3. Ruido	38
3. Infraestructura de la ETM	41
3.1. Antena 2A	41
3.1.1. Mantenimiento correctivo 2017-2019	41
3.1.2. Sistema de movimiento y tracking	43
3.1.3. Óptica	45
3.1.4. Bocina de alimentación	47
3.2. Antena 3A	47
3.2.1. Movimiento y tracking	47
3.2.2. Receptor	51
3.3. Antena 106	51
3.4. Conclusiones	55

Tabla de contenidos

4. RFI	57
4.1. Introducción	57
4.2. Acciones de mitigación	59
4.2.1. Prevención	59
4.2.2. Acciones regulatorias	60
4.2.3. Remoción	60
4.3. Desafíos para proyectos de reconversión	62
4.3.1. Monitoreo de RFI - Morelia	63
4.3.2. RFI en Manga	70
4.4. Conclusiones	72
5. Back-ends para caracterización y detecciones tempranas	75
5.1. Desarrollos con Ettus USRP X300	76
5.1.1. Radiómetro	76
5.1.2. Espectrómetro	78
5.2. Radiómetro analógico	78
5.2.1. Diseño	80
5.2.2. Pruebas de laboratorio	81
5.2.3. Ajustes finales	84
6. Modelo de apuntamiento y drift-scans con antena 106	87
6.1. Introducción	87
6.2. Fundamentación	87
6.3. Setup de hardware	89
6.4. Metodología	89
6.5. Resultados	91
6.5.1. Modelo de apuntamiento	91
6.5.2. Drift scans	92
6.6. Discusión	97
6.6.1. Óptica de la antena	97
6.6.2. Consideraciones sobre flujo y respuesta del radiómetro	101
6.7. Conclusiones	102
7. Estimación de edades de núcleos moleculares calientes a partir de observaciones de un solo plato	103
7.1. Introducción	104
7.2. Evolución	104
7.3. Química de HMC	106
7.3.1. Cianopolinas	107
7.3.2. CH ₃ CN	108
7.3.3. CH ₃ OH	109
7.3.4. SO ₂ y OCS	109
7.4. Fuentes observadas	109
7.5. Observaciones	119
7.6. Resultados	120
7.6.1. Líneas de recombinación	122
7.6.2. Datación de fuentes	123
7.6.3. Cinemática	124
7.7. Discusión	126
7.8. Conclusiones	129
8. Conclusiones	131

Tabla de contenidos

Apéndices	133
A. Archivo de configuración del receptor CRFS RFEye Node 100-18	133
B. Diagrama de bloques del ACU de 3A	135
C. Proyecto Ejecutivo de Reconversión de la Antena 2A	137
C.1. Descripción general	137
C.2. Presupuesto	138
C.2.1. Fase 0	138
C.2.2. Fase 1	138
C.2.3. Fase 2	138
C.2.4. Fase 3	138
C.3. Cronograma	140
C.4. Conclusiones	140
D. Parámetros de ajustes a transiciones detectadas en HMC	145
Referencias	147
Glosario	154
Índice de tablas	154
Índice de figuras	157

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación y contexto

En 2012 el Departamento de Astronomía de la Facultad de Ciencias (DA-FCIEN) de la Universidad de la República, fue contactado por un grupo de la Universidad de Manchester vinculado al observatorio de Jodrell Bank (JBO). El motivo fue que este grupo se encontraba trabajando en el diseño de un radiotelescopio, y por motivos de ubicación geográfica (latitud) y ambiente de interferencias en radiofrecuencias (RFI), Uruguay y sur de Brasil resultaban opciones atractivas para su instalación.

El radiotelescopio sería de tránsito, es decir que no contaría con un sistema de movimiento en ningún eje, y constaría de dos reflectores (un paraboloide de 40m de diámetro, y un hiperboloide de 36m), y ubicado en el plano focal de este diseño, un array de unas 50 bocinas (*horns*), cada una de unos 2m de largo.

El instrumento operaría en banda L (980-1260 MHz), para la observación de la línea de 21cm de Hidrógeno con corrimientos Doppler entre $z=0.13-0.48$, y el objetivo científico de estas mediciones sería detectar las oscilaciones acústicas bariónicas (BAO, por su sigla en inglés) como forma de constreñir parámetros y estructura del sector oscuro. Por ello se dio en llamar Proyecto BINGO, acrónimo de *Baryon acoustic oscillations from Integrated Neutral Gas Observations* ([Battye et al., 2013]).

El proyecto captó el interés del DA-FCIEN, que vislumbró rápidamente el impacto que un proyecto de estas características tendría en el desarrollo académico (más allá de la astronomía), tecnológico e industrial del país, al tratarse de un proyecto científico de gran envergadura dada su inversión. El diseño del instrumento requería, además de un ambiente con niveles extremadamente bajos de RFI, la existencia de una pared vertical natural de unas decenas de metros de altura: canteras abandonadas, despeñaderos, cerros, etc. Rápidamente entonces se comenzó una intensa labor de identificación de potenciales sitios con estas características en distintos departamentos del país, y se emprendió una campaña de mediciones in-situ de RFI. Localmente se involucró activamente el Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM) a través de la Dirección Nacional de Telecomunicaciones y Servicios de Comunicación Audiovisual (DINA-TEL), y a nivel regional un grupo de la Universidad de San Pablo (USP) y del Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (INPE, por su sigla en portugués), de Brasil.

Durante los siguientes cinco años se trabajó intensamente en campañas de medición de RFI in-situ con equipos portátiles en los sitios pre-identificados, se estableció contacto con autoridades departamentales y municipales, con la Unidad Reguladora de Servicios de Comunicaciones (URSEC) para explorar acciones de protección de RFI en una zona circundante a la ubicación del observatorio, entre otras gestiones. Se participó también en todas las reuniones de trabajo presenciales del proyecto que normalmente tenían lugar en la USP, así como de las frecuentes

Capítulo 1. Introducción

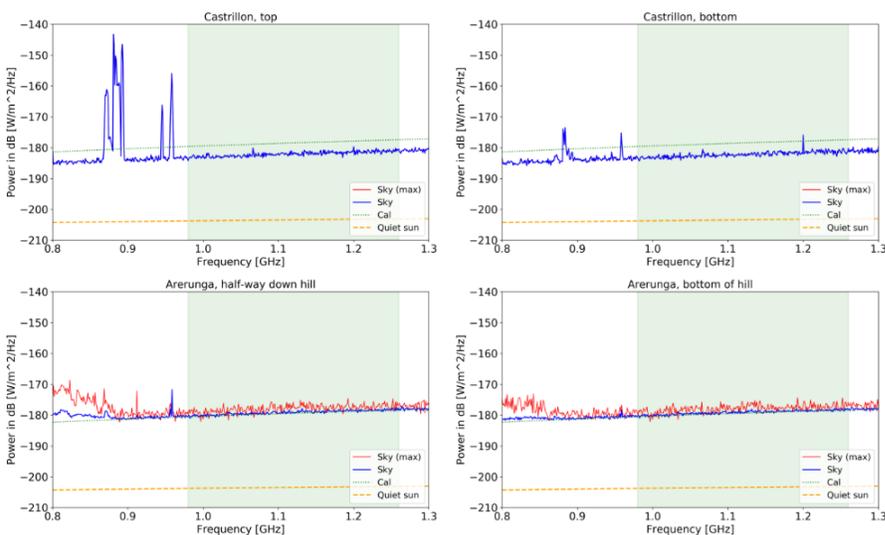


Figura 1.1: Resultados de las mediciones de RFI llevadas a cabo por el autor en el marco del Proyecto Bingo, en los sitios de Castrillón (Minas de Corrales, Rivera) y Arerungá (Salto) (fuente de imagen: [Peel et al., 2019]).

videoconferencias que se realizaban típicamente de forma quincenal.

El autor participó activamente en todas estas actividades. En particular, llevó a cabo las mediciones de RFI en Arerungá (departamento de Salto) y Minas de Corrales (departamento de Rivera), con un analizador de espectro portátil y una antena tipo *discone*. Los resultados de estas mediciones están contenidas en [Peel et al., 2019], y se reproducen en la Figura 1.1.

Desafortunadamente, en 2017 el grupo de dirección del proyecto resolvió localizar el instrumento en el noreste de Brasil, en parte debido a que la financiación a esta altura era prácticamente brasileña en su totalidad. Como consecuencia de esta decisión, el grupo local se desvinculó del Proyecto BINGO. No obstante, el grupo de JBO sugirió al uruguayo la utilización de la antena de 32m de la Estación Terrena de Manga (ETM) como radiotelescopio, y de existir interés, ponerlo en contacto con una iniciativa liderada por un grupo de la Universidad de Leeds, que buscaba conformar una comunidad de personas, grupos de investigación e instituciones involucradas o con interés en involucrarse en la reconversión de antenas de telecomunicaciones en desuso, en radiotelescopios.

Dicha iniciativa, denominada *Development through Radio Astronomy Global Network*¹ (DRAGN), había obtenido financiación para la realización de cuatro talleres durante el transcurso de 2019, cada uno vinculado a distintos aspectos involucrados en proyectos de reconversión de este tipo. Inmediatamente se realizaron desde el DA-FCIEN y MIEM-DINATEL las gestiones con ANTEL planteando la idea del proyecto, obteniéndose de parte de la Gerencia correspondiente y del Directorio de la empresa un excelente nivel de respuesta.

Se comenzó entonces a trabajar junto con el personal técnico de la ETM en el relevamiento del estado de la antena de 32m (en adelante, 2A) y sus diferentes partes: reflector principal, subreflector, sistema de movimiento, revisión de documentación técnica, etc.

Este análisis permitió elaborar un proyecto ejecutivo de reconversión de la antena. Este proyecto, en cuya elaboración y redacción participó activamente el autor, se incluye en el Anexo C y contiene presupuesto y cronograma de ejecución. Al cabo de la primer fase se dispondría

¹ Sitio web: <https://dragn.info/>

1.2. Taller en Ghana: los desafíos técnicos

de un radiotelescopio con un sistema de movimiento moderno basado en motores DC de potencia y PLC, un receptor a temperatura ambiente centrado en 6.7 GHz, estructura de soporte pintada y totalmente acondicionados el reflector principal y subreflector. Este proyecto ejecutivo fue presentado ante las autoridades de MIEM, ANTEL y UDELAR junto con una propuesta de convenio específico a fines de 2019, quedando luego en suspensión.

Previamente, en el transcurso de 2019 se desarrollaron los talleres de DRAGN. El primero, realizado en Ghana en enero, tuvo como centro el conjunto de desafíos técnicos involucrados en la reconversión de antenas de telecomunicaciones para radioastronomía. El segundo se desarrolló en febrero en Ciudad de México y se enfocó en las posibilidades científicas de varios radiotelescopios de este tipo operando en red, mediante la técnica conocida como Interferometría de Muy Larga Línea de Base (VLBI, por su sigla en inglés). El tercero, realizado en junio de 2019 en la Estación Terrena de Goonhilly (Cornualles, Reino Unido), emblemática en la historia de las telecomunicaciones por haber sido una de las estaciones que participó en la recepción de la señal del primer alunizaje, versó sobre el impacto en el desarrollo socio-económico de este tipo de iniciativas. Cornualles es la región con los indicadores socio-económicos más bajos de Reino Unido, y el proyecto de reconversión de una de las antenas de Goonhilly, que forma parte de un conjunto mayor de iniciativas vinculadas al desarrollo del sector espacial y liderados por la Agencia Espacial Británica (UK Space Agency) en la región, es un ejemplo de ello.

El último de estos talleres tuvo lugar en Tailandia y la temática fue "Big data y radioastronomía", puesto que todos los grandes proyectos radioastronómicos planificados o en operación (SKA, e-MERLIN, entre otros) son verdaderas usinas de generación de grandes volúmenes de datos, lo cual significa también un impulso al desarrollo de la tecnología asociada a su manejo, procesamiento y almacenamiento. De este último taller participó un funcionario de ANTEL cuyo trabajo está vinculado al Datacenter de la empresa pública y a *big data*.

El autor participó de los tres primeros talleres, y fue allí que surgió la idea de realizar una tesis doctoral vinculada a la reconversión de antenas de telecomunicaciones en radiotelescopios, inicialmente centrada en la reconversión de la antena 2A.

La presente tesis pretende ser una contribución al desarrollo de la radioastronomía en el Uruguay. El conjunto de actividades realizadas y resultados obtenidos configuran un punto de partida que abre toda una nueva línea de investigación. A su vez, posibilita el desarrollo de proyectos de fin de carrera, tesis de maestría y aun doctorado, en áreas conexas directamente vinculadas al desarrollo de esta área: electrónica de potencia y control, ingeniería civil, mecánica, radiofrecuencias, ingeniería de sistemas.

Para ejemplificar e ilustrar lo antedicho, en los apartados que siguen se brinda un resumen de las exposiciones realizadas en los talleres de DRAGN que muestran cómo otras experiencias han generado este desarrollo.

1.2. Taller en Ghana: los desafíos técnicos

Como ya se señaló, el primero de los talleres de DRAGN se realizó en Ghana entre el 21 y el 25 de enero de 2019 en Accra. Los proyectos de reconversión que en ese momento tenían un mayor nivel de desarrollo eran Ghana, Goonhilly (Reino Unido), Tulancingo (México) y Sicaya (Perú).

Sudáfrica, como miembro del Proyecto SKA, y en particular el Observatorio de Hartebeesthoek (HartRAO) ha tenido un rol muy relevante en la reconversión de la antena de Ghana, y también actuó como promotor de varios estudios de factibilidad de reconversiones en el sur de África (Tanzania, Zambia y Angola) y África Oriental (Madagascar, Mozambique y Kenia). A esta lista se suman otros países de la región que junto con Sudáfrica forman parte del SKA: Botswana, Mauritania y Namibia ([Duah Asabere et al., 2015]).

Los principales desafíos técnicos que debieron afrontar los mencionados proyectos de reconversión pueden agruparse en los siguientes ítems:

Capítulo 1. Introducción



Original DC motor – 450 kg



Servo motor – 50 kg

Figura 1.2: Motor original (izq.) y servomotor con que se lo reemplazó (der.) para el sistema de apuntamiento de la antena, del radiotelescopio de Ghana. (Cortesía de Japie Ludick, grupo AVN de SARAO).

- Sistema de apuntamiento y control;
- Óptica;
- *Feedhorn* y Receptor;
- Estructura de soporte.

A continuación se describe sucintamente los desafíos más comunes vinculados a cada uno de estos subsistemas.

1.2.1. Sistema de apuntamiento y control

Dentro del primer ítem, en general la estrategia seguida consistía en el reemplazo total de los motores de elevación y acimut, y su sustitución por servomotores², fácilmente controlables por un PLC moderno (Figura 1.2).

Además del reemplazo de motores, en el caso de Ghana por ejemplo se sustituyeron los encoders por unos de mayor precisión, así como los switches limitadores en acimut y elevación, y se realizó una limpieza y cambio de aceite del sistema de lubricación. Por supuesto que la unidad de control de antena (ACU) fue reemplazada totalmente por un sistema nuevo basado en PLC.

A pesar del conjunto de tareas vinculadas a este ítem, y la inversión necesaria asociada a ello, es posible realizar una primera aproximación a la adaptación del ACU a las necesidades de un radiotelescopio, a través del diseño de una interface que permita utilizarla de forma remota o presencial a través de una PC. Esta fue la estrategia emprendida inicialmente por el grupo del proyecto de Sicaya, en Perú. Cabe destacar que esta interface fue diseñada en el marco de un proyecto de grado.

1.2.2. Óptica

En lo que refiere a la óptica del sistema, las principales tareas usualmente son limpieza y eventualmente reparación de alguna parte del reflector principal y subreflector, y medición del error RMS de la superficie con respecto a una superficie de ajuste, para establecer así el límite superior de frecuencia que puede operar el radiotelescopio. Ello se determina a través de la ecuación de Ruze, que vincula la ganancia real de la antena G con el valor RMS de las desviaciones de la superficie real con respecto a una superficie ideal, σ_{RMS} ([Ruze, 1966]):

²Por ejemplo, <https://www.moog.com/products/motors-servomotors/servo-motors.html>

1.2. Taller en Ghana: los desafíos técnicos

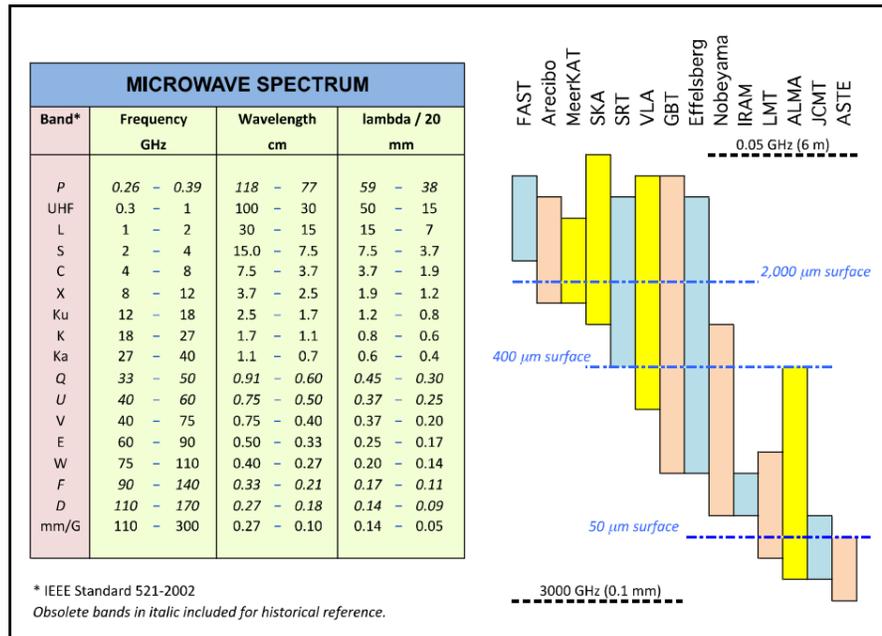


Figura 1.3: Cuadro que indica los límites de Ruze para distintas bandas de microondas, así como las bandas de operación de distintos instrumentos radioastronómicos. (Cortesía de David Gale, INAOE).

$$G = G_0 \cdot e^{-\left(\frac{4\pi\sigma_{RMS}}{\lambda}\right)^2} \quad (1.1)$$

donde G_0 es la ganancia nominal de la antena, y λ la longitud de onda. El criterio que suele adoptarse comúnmente es que la longitud de onda mínima a la que puede operar el radiotelescopio ocasiona una pérdida de ganancia del 33 % ($G/G_0 = 0,67$). Utilizando la Ecuación 1.1 se deriva fácilmente que esto se cumple si:

$$\lambda = \frac{4\pi\sigma_{RMS}}{\sqrt{\ln(1/0,67)}} \approx 20\sigma_{RMS} \quad (1.2)$$

Esto determina a su vez las posibilidades científicas del instrumento y por ello suele formar parte de la Fase 0 de un proyecto de reconversión. En el cuadro de la Figura 1.3 se muestran los valores de desvíos RMS máximos que puede tener un reflector en las distintas bandas de microondas.

Existen varias técnicas para obtener el error σ_{RMS} : holografía, tracking con láser, fotogrametría, teodolito.

La holografía consiste en colocar un receptor en el foco del reflector y detectar tránsitos de fuentes en distintas direcciones. Por lo general, suele utilizarse fuentes artificiales. Requiere, asimismo, una antena de referencia. Su principal desventaja es que la cobertura de la superficie es limitada, pero como contrapartida es un método rápido, que usualmente se realiza en las primeras etapas de fabricación, como método *in-house* de verificación ([Gale D., 2019]).

El tracking con láser utiliza un interferómetro láser que mapea la superficie midiendo distancias a puntos, con incertidumbres típicas del orden de decenas de micras. Entre sus ventajas destacan su alta precisión y resolución espacial, así como su portabilidad. Las desventajas son

Capítulo 1. Introducción



Figura 1.4: Obtención de imágenes para fotogrametría, realizada en la antena de 9m de la Universidad de Costa Rica. (Cortesía de David Gale, INAOE).

que requiere una montura estable, es lento para generar una nube de datos relativamente grande, y no es práctico para reflectores grandes. Más bien se adecua a platos de $D \leq 5\text{m}$.

Por último, la fotogrametría es la técnica más ampliamente usada para medir reflectores ya construidos e instalados. Posee incertidumbres típicas menores a las obtenidas con un tracker láser, del orden de algunas micras. Implica primeramente la limpieza del reflector (lo cual para uno de 32m conlleva típicamente cientos de hh), y posteriormente la colocación de adhesivos reflectores sobre la superficie (unos 2000 en total, típicamente ~ 100 hh), y posteriormente sacar fotos desde distintas posiciones desde la canastilla de una grúa (Figura 1.4). Se utiliza típicamente una cámara digital de 12 bit/8MP ([Gale D., 2019]).

Una imagen de los resultados de fotogrametría aplicada al reflector principal del Gran Telescopio Milimétrico (GTM) se muestra en la figura 1.5.

Finalmente, es posible obtener una primera aproximación para un reflector de gran porte mediante el uso de un teodolito, tal como se describe en [Pollak, 2018]. En dicha tesis doctoral se explica que se utilizó este método para caracterizar el reflector principal, en lugar de fotogrametría, dado que la antena en ese momento no se podía mover y no estaba en posición de copa (es decir, a una elevación de 0°), imposibilitando el trabajo de colocación de reflectores, etc. El modelo utilizado en ese trabajo para el perfil del reflector es de un polinomio de cuarto orden.

1.2.3. *Feedhorn* y receptor

En lo que respecta a la bocina de alimentación (*feedhorn*), de lo que se trata en primera instancia es determinar si la existente es adecuada a todo el rango de frecuencias del proyecto. Usualmente se comienza con receptores centrados en 6.7 GHz y algunos cientos de MHz de ancho de banda por lo que el *feedhorn* preexistente suele resultar adecuado³.

³Esto es debido a que el enlace de subida en satélites de telecomunicaciones siempre está en ~ 6 GHz.

1.2. Taller en Ghana: los desafíos técnicos

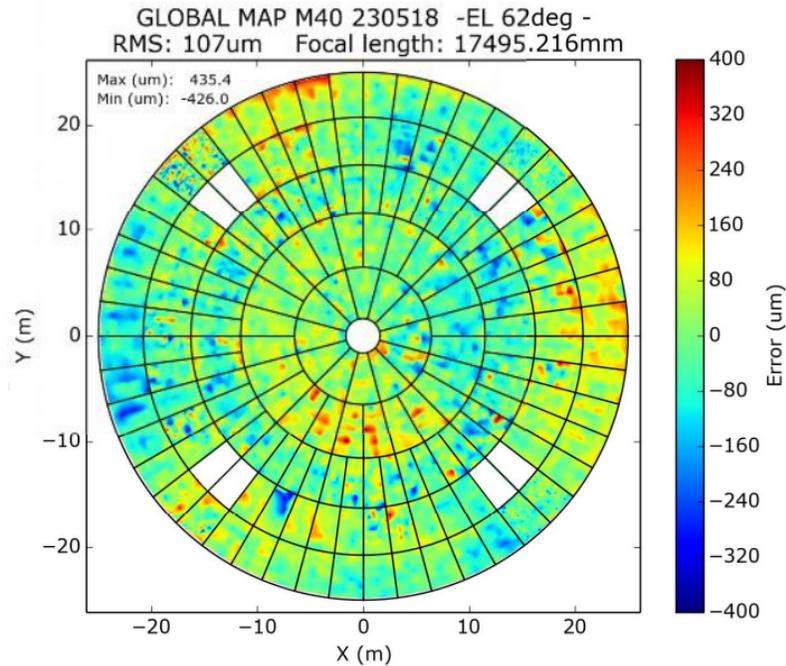


Figura 1.5: Resultados de la fotogrametría realizada para el reflector principal del GMT. (Cortesía de David Gale, INAOE).

En general, es preciso considerar que las bocinas corrugadas diseñadas para comunicaciones satelitales, pueden no estar optimizadas para cubrir todo el rango desde el *downlink* (~4 GHz) al *uplink* (~6 GHz). La mejor forma de determinar su desempeño es conectarle un transductor ortomodal (en adelante, OMT) de banda ancha y medir las pérdidas de retorno⁴.

En etapas más avanzadas de un proyecto de reconversión, o a veces en Fase 1 como en el caso de Tulancingo y Goonhilly, por ejemplo, suele ser necesario el reemplazo de la bocina de alimentación existente. En el caso de estos proyectos, que utilizan un receptor criogénico diseñado para abarcar el rango de 4-8 GHz, la bocina preexistente no resultaba adecuada y fue reemplazada por una diseñada a medida, por un grupo de la Universidad de Oxford ([Pollak, 2018]).

Una bocina diseñada a medida debe por supuesto cubrir el rango de operación del receptor. El rango de operación o ancho de banda δf de una antena usualmente se expresa en términos relativos a la frecuencia central f_0 . Para anchos de banda amplios se suele utilizar el ratio $f_{max}/f_{min} : 1$. Así por ejemplo, un ancho de banda de 2:1 expresa que la frecuencia máxima es el doble que la mínima ([Kildal, 2000], p. 80).

Un ancho de banda 2:1 es el caso para un receptor 4-8 GHz. Sin embargo, es buena práctica diseñar el ancho de banda de la bocina algo superior al del receptor, típicamente al menos 2.2:1.

Sucintamente, el proceso de diseño de una bocina de alimentación implica definir su adaptación a la óptica existente (su ubicación con respecto al subreflector), luego su geometría, posteriormente su corrugación interior. En este proceso se utilizan herramientas de diseño como GRASP⁵ y CHAMP⁶ También en MATLAB hay implementado un conjunto de funciones que

⁴Comunicación por correo electrónico con Alex Pollak.

⁵Disponible aquí (11/3/2024).

⁶Corrugated Horn Analysis by Modal Processing. Disponible aquí(11/3/2024).

Capítulo 1. Introducción

permiten diseñar y simular el desempeño de distintos tipos de bocina⁷.

El nivel de potencia en los bordes del reflector con respecto al nivel en su centro se denomina en la literatura *edge-taper value*, y se expresa en dB. Así por ejemplo, un *edge-taper* de 10dB significa que la atenuación en los bordes del reflector con respecto al centro es de 10dB. Por un lado, se busca maximizar la atenuación en los bordes a los efectos de minimizar las pérdidas por derrame (en inglés, *spillover*). Por otro lado, cuanto mayor es el valor de esta atenuación, mayor es también el nivel de los lóbulos secundarios, lo cual obviamente no es deseable, por lo cual hay aquí un compromiso a la hora de definirlo en un diseño determinado ([Pollak, 2018]).

Usualmente la geometría de una bocina de alimentación es la de un cono truncado. El área mayor es la posterior, enfrentada al subreflector, y está determinada por el *edge-taper* definido. La anterior es la que se adapta al OMT (cuya función es separar en dos polarizaciones la señal para el receptor) y por lo tanto su tamaño estará determinado por este. El largo de la bocina estará entre $4.2\lambda_0$ y $25\lambda_0$; para 6 GHz, será entre 0.21 y 1.25m ([Pollak, 2018]).

Por lo general, en la Fase 1 de un proyecto de reconversión el receptor será de temperatura ambiente y centrado en 6.7 GHz. Como ya se señaló, esto obedece a que un receptor de estas características se adapta sin mayores inconvenientes a la bocina de alimentación y OMT existentes de la mayoría de las antenas de estaciones terrenas. Sin embargo, esta generalización oculta algunos matices. La elección de la banda de operación estará dictada en realidad por el presupuesto disponible, en combinación con aspectos de carácter técnico, como los vinculados a las características del sistema óptico de la antena que se plantea reconvertir.

El diseño para esta primera etapa consiste simplemente en la elección de un amplificador de bajo ruido (en adelante, LNA) adecuado, disponible en el mercado, oscilador local y mezclador. Todos estos componentes -que conforman lo que se llama el *front-end* del receptor- son hoy en día fácilmente accesibles y no constituyen una inversión significativa (~3k USD). Para el *back-end*, la elección más obvia será un SDR (*Software Defined Radio*) conectado a una PC local. Existe una pléyada de opciones para el SDR, y la elección del adecuado dependerá fundamentalmente del ancho de banda buscado.

Para etapas más avanzadas del proyecto, se requerirá un receptor criogénico y un *back-end* más sofisticado, seguramente basado en tarjetas RFSoc (*Radio frequency System-on-chip*), que muestrean directamente la señal RF. Algunas de las ventajas de estas tarjetas son su flexibilidad (facilitan enormemente la programación y customización del *back-end* a las necesidades del proyecto), reducción de costos incluyendo operativos (consumo eléctrico), y en general mayor simplicidad y menor número de componentes de hardware.

1.3. Taller en Ciudad de Mexico: redes VLBI

El segundo de los talleres DRAGN fue realizado en Ciudad de México entre los días 25/2 y 1/3 de 2019.

Las charlas versaron sobre las posibilidades científicas de observar con varias antenas, separadas miles de km, a la vez, utilizando la técnica de Interferometría de Muy Larga Línea de Base (VLBI, por su sigla en inglés). Lo que diferencia VLBI de interferometría regular es que la correlación entre las señales del interferómetro no son correlacionadas en tiempo real sino almacenadas y enviadas o transferidas al correlador, en el que se realiza la correlación a posteriori. Esto requiere que todas las estaciones que conforman una red VLBI deben disponer de un reloj de alta precisión (típicamente un máser de hidrógeno). A este requerimiento, que implica una inversión considerable, se suman desafíos vinculados a la transferencia, almacenamiento y manejo de grandes volúmenes de datos.

Se trata de la técnica que obtiene las mayores resoluciones angulares en todo el campo de la astronomía, y que posibilitó la primera imagen de un agujero negro ([Colomer, 2019]):

⁷Mathworks-Horn Antennas. Disponible aquí(12/3/2024).

1.3. Taller en Ciudad de Mexico: redes VLBI

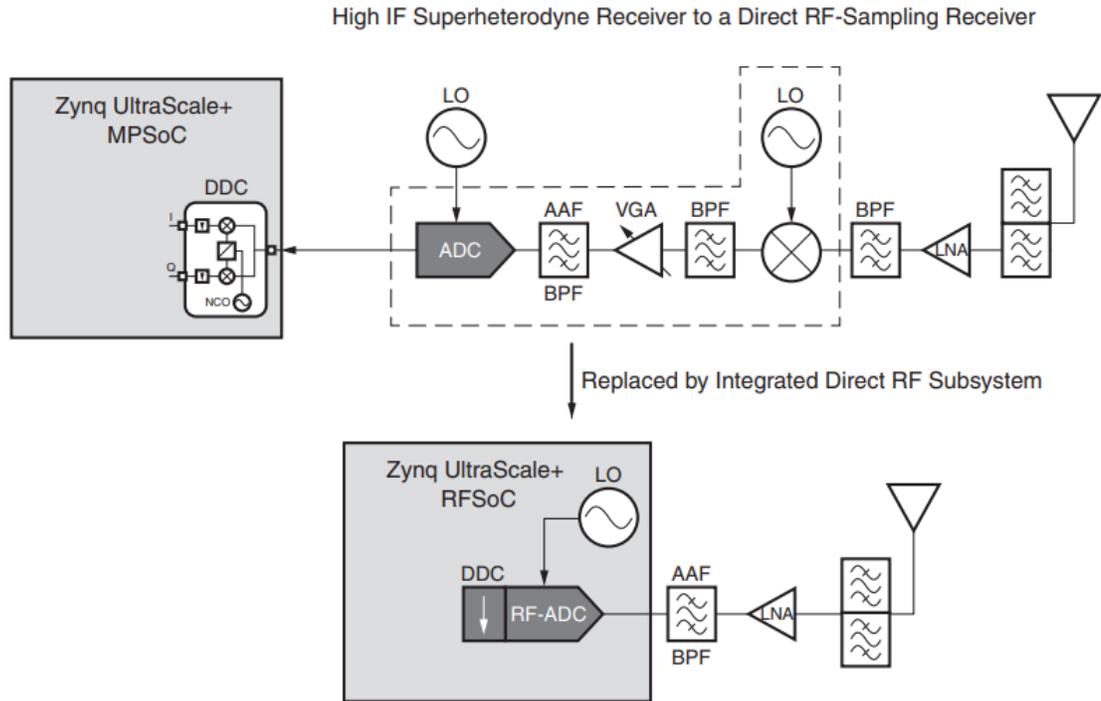


Figura 1.6: Principio clásico de diseño de *back-* y *front-end* basado en receptor superheterodino, y diseño basado en tarjeta RfSoC (Fuente de imagen: [Xilinx, 2019]).

- A 1.4 GHz, un array de mayor línea de base igual a 8.000 km tendrá una resolución de ~ 7 mas.
- A 43 GHz, el mismo array tendrá una resolución de $\sim 200 \mu\text{s}$.
- A 230 GHz: $\sim 30 \mu\text{s}$.

Otra característica particular de VLBI es la cantidad de datos generados (~ 2 Gbps por antena, lo que se traduce en TB por día), y la tendencia creciente es que sean enviados en tiempo real por Internet al correlador (lo que se conoce como *e-VLBI*).

Existen varias redes de VLBI en el mundo. Por un lado, está la *European VLBI Network*, que a pesar de su nombre comprende también radiotelescopios localizados en África y Asia. El *Very Long Baseline Array* consiste de 10 antenas ubicadas en distintos Estados de los EE.UU, incluyendo Hawái. En Asia está el *East Asian VLBI Network*, conformado por radiotelescopios en Japón, China y Corea del Sur. Como ya se señaló, está en proceso más bien embrionario la conformación de la *African VLBI Network*.

Además de utilizarse con fines astronómicos en el estudio de estructuras del orden de milésimas de segundo de arco, la técnica de VLBI puede utilizarse con fines geodésicos, en cuyo caso hablamos de "VLBI geodética". En este caso lo que se observan son fuentes puntuales, como cuásares, núcleos galácticos activos (AGN), o radiogalaxias. Existe una organización que coordina observaciones de VLBI geodéticas, la *International VLBI Service for Geodesy and Astronomy* (IVS). Dentro de esta red se está tendiendo hacia la conformación de un *VLBI Global Observing System* (VGOS), y la infraestructura a la que se tiende es a antenas relativamente pequeñas (12-13m), rápidas ($12^\circ/\text{s}$) y con receptores de gran ancho de banda (2-14 GHz). Las aplicaciones de observaciones de VLBI geodética son variadas:

Capítulo 1. Introducción



Figura 1.7: Estación Terrena de Goonhilly. (Cortesía de Ian Jones).

- generación de parámetros de orientación terrestre (EOP, por su sigla en inglés), indispensable para sistemas de posicionamiento satelital (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou);
- medición de deriva continental;
- deformaciones de la corteza terrestre;
- astrometría;
- soporte para navegación espacial.

Para que una estación pueda formar parte de una red VLBI, es preciso que posea una fuente local de tiempo preciso, lo cual es proporcionado -para los requerimientos de VLBI- preferentemente por relojes de máser de hidrógeno. Puesto que su costo es relativamente elevado, constituye una importante barrera de entrada para incorporar nuevas estaciones a redes existentes, o para conformar nuevas redes como es la intención a largo plazo de la *Iniciativa VLBI para Iberoamérica*. Cabe destacar que esta iniciativa de hecho nació en los talleres DRAGN entre los participantes latinoamericanos, inicialmente como una red de personas, grupos e instituciones abocadas en mayor o menor medida a proyectos de reconversión de antenas de telecomunicaciones en desuso en radiotelescopios.

Si bien el ímpetu inicial se vio seriamente afectado por la pandemia del COVID-19 y otros factores, se desarrolló un encuentro informal durante la XVII Reunión Regional Latinoamericana de la Unión Astronómica Internacional, realizada en Montevideo en diciembre de 2023.

1.4. Taller en Goonhilly: impacto socioeconómico

El penúltimo de los talleres DRAGN y último de los que participó el autor, fue realizado en junio de 2019 en la Estación Terrena de Goonhilly (Figura 1.7), en Cornwall (Reino Unido).

Durante esa semana se expuso sobre distintas experiencias que muestran el impacto socioeconómico que la radioastronomía en general, y este tipo de proyectos de reconversión en particular, pueden tener en países o regiones con menores niveles de desarrollo de esta área.

El propio caso de Cornwall ilustra esto, puesto que se trata de la región con indicadores de desarrollo socio-económico más bajo del Reino Unido. En la Estación de Goonhilly se ha hecho una fuerte apuesta público-privada para conformar allí un polo tecnológico espacial, sobre la base del concepto de co-localización de infraestructura para aplicaciones astronómicas y vinculadas al sector espacial. Aquí conviven la infraestructura preexistente de Goonhilly (antenas Goonhilly1-3) con antenas nuevas, más rápidas y de menor diámetro para telemetría, tracking y comando

1.5. Estructura del documento

(TT&C, por su sigla en inglés) de satélites en órbita baja, conectividad por fibra óptica terrestre de 2x100 Gbps. A su vez, Goonhilly es una de las estaciones de amarre del cable submarino SEA-ME-WE 3, por lo que constituye infraestructura estratégica del Reino Unido.

Una de las experiencias interesantes en Goonhilly está vinculada al uso de la antena Goonhilly-3 para fines tanto radioastronómicos como de comunicaciones satelitales. Esto es posible gracias a la flexibilidad que brindan los *back-end* digitales descritos en el apartado anterior, así como los sistemas modernos y flexibles de apuntamiento basados en PLC que permiten configurar múltiples modos de seguimiento.

Este concepto de co-localización fue también aplicado en África a través del denominado *African Co-location Program*, en el Observatorio Radioastronómico de Sudáfrica (SARAO, por su sigla en inglés). Aquí se combinan usos radioastronómicos con servicios de observación de la Tierra. Estos últimos generan los ingresos que permiten autosustentar toda la actividad del complejo, e incluyen el desarrollo de los satélites multiespectrales que realizan las observaciones, y cuyo TT&C es realizado desde la estación terrena. Se trata de un programa con fuerte inversión pública y proyección regional, y la mayor parte de los servicios brindados tienen que ver con productos satelitales vinculados al agro. Esta es una experiencia sin duda a tener en cuenta en un plan a largo plazo para la Estación Terrena de Manga.

1.5. Estructura del documento

La presente tesis describe el conjunto de actividades desarrolladas por el autor, y vinculadas a la reconversión de una antena de telecomunicaciones en desuso en un radiotelescopio.

La intención inicial era que la presente tesis estuviera centrada en la reconversión de la antena 2A. Cuando este proyecto se puso en *stand-by*, se decidió pivotear hacia actividades vinculadas a la reconversión de la antena de Tulancingo. Fue así que se trabajó en una estación de monitoreo de RFI a ser instalada junto a dicha antena, así como en la realización de un espectrómetro y de un radiómetro a partir de la programación de un SDR.

Paralelamente, y como práctica de reducción de datos radioastronómicos obtenidos con un solo plato, se trabajó con datos crudos de un relevamiento de núcleos moleculares calientes (en adelante, HMC) en banda Ka realizadas en 2011 con el GBT.

En 2023 se realizó un acuerdo con ANTEL mediante el cual se permitía el uso de la antena 3A de 16.4m con fines radioastronómicos, acceso a la Estación Terrena y apoyo del personal técnico. Una vez comenzados los trabajos con esta antena, y dadas sus limitaciones en movimiento, se tornó igualmente atractiva la antena 106 de 4.2m para realizar tareas de caracterización. A pesar de su menor tamaño, esta antena posee mayor movilidad en acimut y elevación, y dos receptores, uno en banda Ku y otro en banda C, lo cual le agregaba una mayor flexibilidad comparado a la 3A, que cuenta con un único receptor dual en banda C (3.7-4.2 GHz).

Los resultados de estas actividades se organizan en la presente tesis de la siguiente manera. El Capítulo 2 describe algunos de los conceptos teóricos clave vinculados a instrumentación y radioastrofísica, que si bien son de carácter fundamental considero importante incluirlos dada la escasa experiencia nacional en radioastronomía.

El Capítulo 3 describe detalladamente las características técnicas de la infraestructura de la ETM, que ANTEL puso a disposición para investigación radioastronómica de la presente tesis y a futuro.

El Capítulo 4 describe lo realizado en el área de RFI: la estación de monitoreo para Tulancingo, y el análisis y mitigación de la RFI debida a 5G en la ETM. El Capítulo 5 describe un *back-end* digital basado en un SDR para banda L a ser testeado en Tulancingo, que posibilita su uso como espectrómetro y radiómetro. Asimismo, se describe un radiómetro de diseño propio basado en un componente *off-the-shelf* y utilizado en la antena 106 de la ETM para obtención de un modelo de apuntamiento de esta antena, y detección de tránsitos del Sol y la Luna, lo cual es descrito en el Capítulo 6.

Capítulo 1. Introducción

El Capítulo 7 describe el análisis y resultados científicos del relevamiento de HMC realizado con el GBT en banda Ka. Finalmente, las conclusiones de esta tesis y las perspectivas futuras para el desarrollo de la radioastronomía en el país se detallan en el Capítulo 8.

Capítulo 2

Fundamentos de radioastronomía: teoría e instrumentación

En este capítulo se brinda un panorama general de algunos de los principales conceptos utilizados en radioastronomía, tanto en lo que refiere a los procesos astrofísicos que dan lugar a emisión de radiación electromagnética en esta porción del espectro, como a los instrumentos y métodos utilizados para su detección.

Si bien los contenidos de este capítulo corresponden a cursos de grado de radioastronomía, siendo por lo tanto más bien básicos y no de postgrado, resulta pertinente su incorporación en esta tesis dada la escasa experiencia local en esta disciplina. Las fuentes bibliográficas utilizadas en este Capítulo son [Snell et al., 2019], [Marr et al., 2015], [Wilson et al., 2013], [Estalella and Anglada, 1999] y [Kildal, 2000], así como material del curso *Radioastrophysics* dictado por Susanne Aalto y John H. Black en 2007 en el programa RAMAS (*Master's in Radioastronomy and Space Sciences*) de la Universidad Técnica Superior Chalmers (Gotemburgo, Suecia), cursado por el autor.

Otras referencias utilizadas puntualmente se explicitan en el texto donde corresponde.

2.1. Radioastrofísica

La radioastronomía comprende el estudio de la radiación electromagnética de origen astronómico en el rango de frecuencias de 10 MHz (30m) y hasta 300 GHz (1mm), aunque también comprende la parte submilimétrica o terahertziana hasta un límite superior algo difuso, menor a 3 THz.¹ El límite inferior es debido al bloqueo de las frecuencias más bajas por la interacción con electrones en la ionósfera.

En otras palabras, comprende la denominada *ventana de radio* más la región submilimétrica, aunque las tecnologías de receptores para estas últimas son bien diferentes que para ondas milimétricas y son, o bien basadas en mixers SIS (*Superconductor-Insulator-Superconductor*), o en bolómetros, mientras que para microondas el esquema básico es el de un receptor superheterodino.

El rango de microondas (1-100 GHz) suele a su vez subdividirse en bandas, cuya nomenclatura es de origen militar, y se muestran en la Tabla 2.1.

En los apartados que siguen se describen los principales procesos que dan lugar a emisión de ondas de radio en el Universo.

¹Por ejemplo, la banda 10 de ALMA llega hasta 950 GHz.

Capítulo 2. Fundamentos de radioastronomía: teoría e instrumentación

Banda	Rango frecuencias [GHz]
L	1-2
S	2-4
C	4-8
X	8-12
Ku	12-18
K	18-26
Ka	26-40
U	40-60

Tabla 2.1: Subbandas de radar de microondas (Fuente: V. Belitsky, R. Monje, M. Pantaleev y V. Vassilev (2007). *Lecture Handouts - Microwave Engineering in Communications*. Chalmers University Of Technology, 2007.

2.1.1. Energía emitida

Para entender cómo vincular la energía que detectamos con la que es emitida por una fuente astronómica, que en última instancia es lo relevante para a partir de ella poder inferir sus condiciones físicas, químicas, etc., es necesario introducir una serie de conceptos clave.

En primer lugar, la energía total que emite una fuente por unidad de tiempo se llama *luminosidad* y se denota con la letra L . Sus unidades SI son $J \cdot s^{-1}$, y cgs $erg \cdot s^{-1}$. El *flujo* emitido por una fuente resulta una magnitud más conveniente pues expresa la tasa de emisión de energía (J/s) por unidad de superficie (unidades de $W \cdot m^{-2}$), y si la fuente emite de forma isotrópica podemos vincularla directamente a la luminosidad de la fuente:

$$F = \frac{L}{4 \cdot \pi r^2} \quad (2.1)$$

donde r es la distancia a la fuente.

El flujo de la ecuación anterior es un flujo *total*, emitido en un cierto rango de frecuencias o *ancho de banda*, que eventualmente puede ser todo el espectro electromagnético.

Puesto que una observación radioastronómica es realizada con un receptor que tiene un ancho de banda finito, frecuentemente hablamos de *densidad de flujo* F_ν en lugar del flujo total, siendo la primera la derivada de la segunda con respecto a la frecuencia:

$$F_\nu = \frac{dF}{d\nu} \quad (2.2)$$

En ocasiones se refiere en la bibliografía a la densidad de flujo con la letra S_ν , aquí mantengo la notación F_ν para evitar confusiones con la función fuente que se presenta más adelante. En radioastronomía se expresa en unidades de Jansky² ($1 \text{ Jy} = 10^{-26} W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$).

En un esquema simplificado, pues, en que una fuente astronómica, que se encuentra a una distancia d y emite radiación electromagnética de forma isotrópica con una luminosidad L , nosotros vamos a detectar una potencia P con un instrumento con área efectiva A_{eff} y ancho de banda $\Delta\nu$, que se vincula con el flujo de la fuente del siguiente modo:

$$P = F_\nu \cdot A_{eff} \cdot \Delta\nu \quad (2.3)$$

Lo que usualmente reportamos es F_ν , dividiendo la potencia detectada por el área efectiva de nuestro radiotelescopio por el ancho de banda de nuestro receptor.

En este esquema sobre-simplificado, la radiación emitida por la fuente no interactúa de ningún modo con ningún objeto/proceso que la afecte en su trayecto. Esto raramente es el caso,

²En honor a Karl Jansky, quien realizó las primeras detecciones de ondas de radio extraterrestres y es por lo tanto considerado el fundador de la radioastronomía.

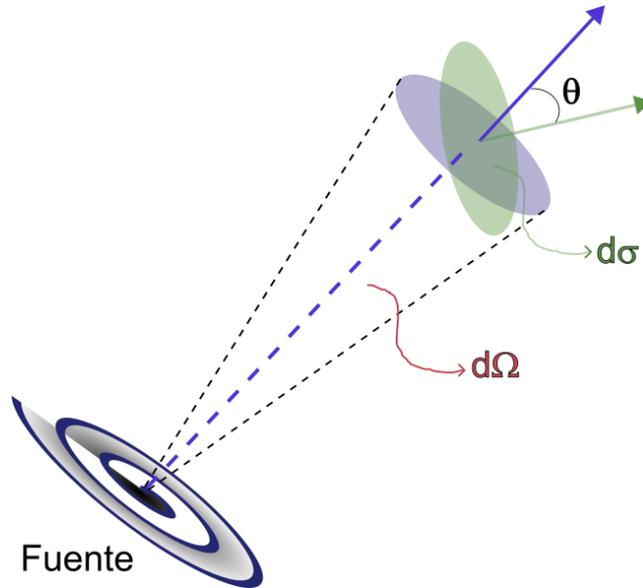


Figura 2.1: Esquema de magnitudes que intervienen en la definición de la intensidad (Fuente de imagen: [Wilson et al., 2013]).

por lo que para poder vincular las detecciones a su origen, es preciso introducir el concepto de *intensidad de radiación*, y describir cómo interactúan la radiación y la materia.

2.1.2. Ecuación de transferencia radiativa

La intensidad específica, comúnmente llamada simplemente intensidad o en ocasiones brillo (*brightness*), es una magnitud esencial en el tratamiento de la propagación electromagnética a gran escala ($r \gg \lambda$). Para definirla, consideremos la potencia interceptada por una superficie infinitesimal $d\sigma$, cuya normal forma un ángulo θ con la dirección dada por el ángulo sólido $d\Omega$ (Figura 2.1).

Esta potencia infinitesimal estará entonces dada por:

$$dP = I_\nu \cos \theta d\sigma d\nu d\Omega \quad (2.4)$$

donde I_ν es la intensidad específica y tiene por unidades $Wm^{-2}Hz^{-2}sr^{-1}$.

La intensidad es entonces el flujo por unidad de ángulo sólido:

$$I_\nu = \frac{F_\nu}{\Omega} \quad (2.5)$$

Si una fuente es puntual con respecto al haz de la antena con la que la estamos detectando, entonces el flujo detectado es el flujo de la fuente. Si la fuente es extendida, lo que detectamos no es el flujo de la fuente pues no todo este flujo está contenido dentro de nuestro haz. En este caso, lo que detectamos es la intensidad de la fuente multiplicada por el haz principal de la antena. Aquí solemos hablar de brillo (*brightness*) para referirnos a la intensidad detectada, y la expresamos en Jy/beam.

En su trayecto desde la fuente hasta nuestra antena, la radiación emitida por la fuente puede interactuar con distintos medios. El cambio infinitesimal de intensidad dI_ν , producido por la interacción de la radiación electromagnética con la materia a nivel macroscópico está dado por la

Capítulo 2. Fundamentos de radioastronomía: teoría e instrumentación

llamada ecuación de transferencia radiativa (ETR):

$$dI_\nu = j_\nu ds - \kappa_\nu I_\nu ds \Rightarrow \quad (2.6)$$

$$\frac{dI_\nu}{ds} = j_\nu - \kappa_\nu I_\nu \quad (2.7)$$

donde j_ν y κ_ν son la emisividad y coeficiente de absorción de radiación del material, respectivamente. Ambos parámetros dependen de la frecuencia ν , por ello se utiliza el subíndice ν que señala esta dependencia. El coeficiente de absorción es el producto de la densidad numérica n de partículas por su área efectiva de absorción σ_ν :

$$\kappa_\nu = \sigma_\nu n \quad (2.8)$$

La profundidad óptica τ es una magnitud definida del siguiente modo³:

$$\tau_\nu(s) = \int_0^s \kappa_\nu ds \quad (2.9)$$

Al cociente entre la emisividad y el coeficiente de absorción se le llama función fuente, S_ν . Utilizando estas definiciones podemos reescribir la 2.7 del siguiente modo:

$$\frac{dI_\nu}{d\tau_\nu} = \frac{j_\nu}{\kappa_\nu} - I_\nu = S_\nu - I_\nu \quad (2.10)$$

En equilibrio termodinámico (ET) la solución a la Ec. (2.10) es la función de Planck:

$$\frac{dI_\nu}{ds} = 0 \Rightarrow I_\nu = S_\nu = B_\nu(T) \quad (2.11)$$

En ocasiones es posible aplicar localmente la condición de ET (Ley de Kirchoff):

$$B_\nu(T) = \frac{j_\nu}{\kappa_\nu} \quad (2.12)$$

en cuyo caso hablamos de equilibrio termodinámico local (LTE, por su sigla en inglés).

La solución general a la ETR (Ec. 2.10) es:

$$I_\nu(s) = I_{\nu,0} e^{-\tau_\nu} + \int_0^{\tau_\nu(s)} S_\nu e^{-(\tau_\nu(s)-\tau'_\nu)} d\tau'_\nu \quad (2.13)$$

Si la función fuente es independiente de la posición, la solución se simplifica en algo pues S_ν puede extraerse fuera del integrando en la Ec. 2.13, resultando:

$$I_\nu(s) = I_{\nu,0} e^{-\tau_\nu} + S_\nu (1 - e^{-\tau_\nu(s)}) \quad (2.14)$$

Un caso particular de esta ecuación se discute más adelante, en relación a líneas espectrales.

2.1.3. Continuo de radio

La radiación emitida por una fuente radioastronómica puede tener un espectro continuo a lo largo de un amplio rango de frecuencias, o puede estar confinada a un rango muy angosto del espectro radioeléctrico. En el primer caso hablamos del continuo de radio, en el segundo caso hablamos de líneas espectrales.

Distintos procesos pueden dar lugar a la emisión de un espectro continuo, y la primera gran distinción es entre emisión *térmica* y *no térmica*. Hablamos de emisión térmica cuando es producida por una colección de partículas (usualmente electrones) cuya distribución de energía sigue

³En algunos textos (por ej. en [Wilson et al., 2013]) se define la profundidad óptica τ_ν con signo opuesto a la dirección de propagación. Aquí se sigue la definición de [Snell et al., 2019]. En cualquier caso, el resultado final (Ec. (2.14)) es el mismo.

2.1. Radioastrfísica

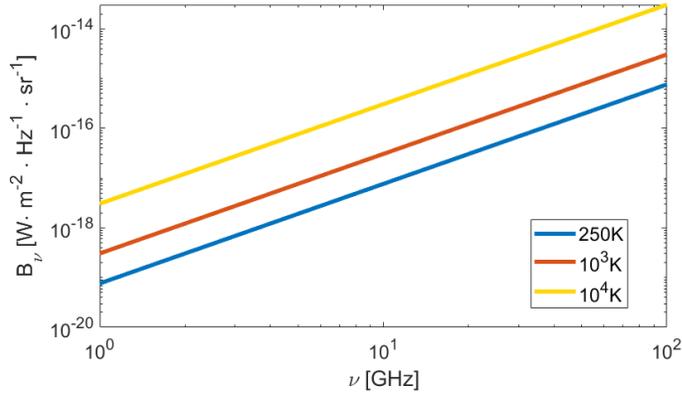


Figura 2.2: Radiación de cuerpo negro en el régimen de Rayleigh Jeans, para distintas temperaturas.

una distribución maxwelliana, es decir, caracterizada por un único parámetro: la temperatura. En caso contrario la emisión no es térmica.

Los dos principales procesos térmicos que dan lugar a emisión continua son:

- radiación de cuerpo negro;
- radiación libre-libre, o de *brehmsstrahlung*⁴.

El principal proceso no térmico que da lugar a emisión continua es la *emisión sincrotrónica*, producida por electrones moviéndose a velocidades relativistas a lo largo de líneas de campos magnéticos.

La expresión analítica de la función de Planck ya mencionada, y que caracteriza la radiación de cuerpo negro, es la siguiente:

$$B(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1} \quad (2.15)$$

donde h es la constante de Planck ($6.626 \cdot 10^{-34}$ Js), k la constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ JK⁻¹), c la velocidad de la luz, y T la temperatura del cuerpo negro.

Si $h\nu \ll kT$, lo cual es válido para radiofrecuencias y valores de temperatura usuales, la ecuación de Planck se simplifica sobremanera. En este régimen, llamado de Rayleigh-Jeans, la ecuación de Planck se vuelve:

$$B_\nu(T) = \frac{2k\nu^2}{c^2} \cdot T = \frac{2k}{\lambda^2} \cdot T \quad (2.16)$$

De esta expresión surge la definición de temperatura de brillo, T_B , como la temperatura a la que $B_\nu(T_B) = I_\nu$.

En otras palabras, en el régimen de Rayleigh-Jeans la radiación de cuerpo negro es proporcional a la temperatura, y al cuadrado de la frecuencia. En escala logarítmica, intensidad y frecuencia son proporcionales (Figura 2.2), y la pendiente de las curvas -denominada en la literatura pendiente espectral, α - es constante e igual a 2.

Si ahora pasamos a la densidad de flujo que detectamos en la Tierra proveniente de distintas fuentes térmicas, nos encontramos que aun en el caso que el mecanismo original que da lugar a la emisión sea cercano al equilibrio termodinámico, la pendiente espectral dependerá de la profundidad óptica τ_ν . Solo si $\tau_\nu \gg 1$ entonces $\alpha \sim 2$.

⁴Vocablo alemán que significa literalmente radiación de frenado, pues alude a la desaceleración que sufren electrones durante un encuentro, y que da lugar a la emisión de radio fotones.

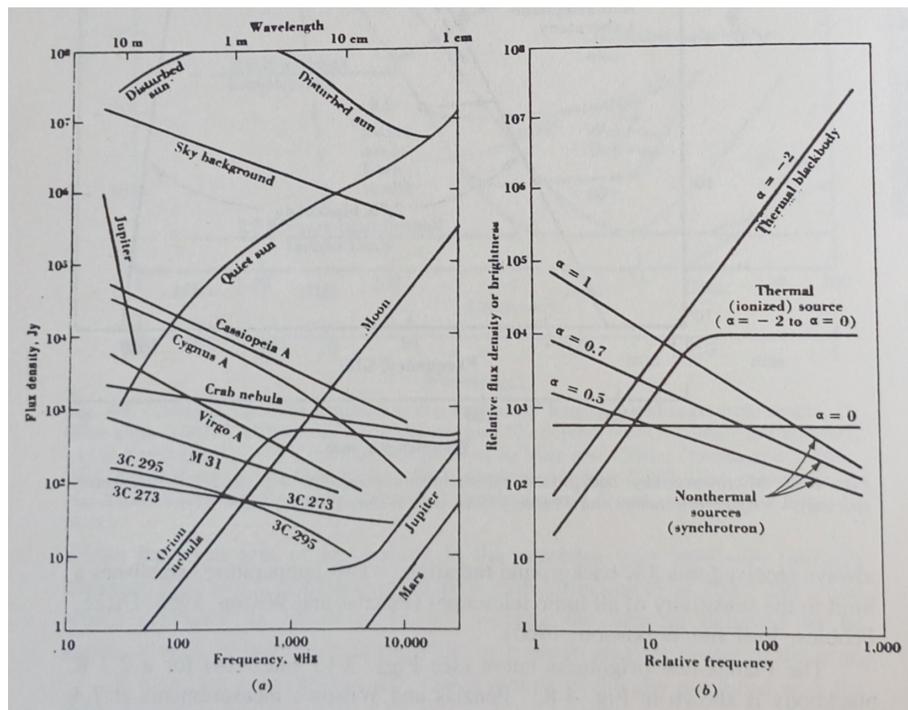


Figura 2.3: Densidad de flujos continuos de algunas fuentes brillantes en radio (izq.), y características típicas de distintos espectros de emisión de continuo de radio (der.) (Fuente de imagen: [Kraus, 1986]).

Son ejemplos de fuentes térmicas la Luna ($T_b \sim 250K$), el Sol inactivo, la nebulosas de gas ionizado (H II, por ejemplo Ori A, $T_b \sim 8000K$), planetas, asteroides y nubes de polvo interestelar. Júpiter presenta además radio emisión sincrotrónica.

El polvo interestelar emite radiación continua en el infrarrojo, en ondas submilimétricas y milimétricas. Representa $\sim 1\%$ de la masa de gas, el otro principal componente del medio interestelar. Está compuesto por pequeñas partículas sólidas (0.01–1 micras) que absorben eficientemente fotones de longitud de onda igual o inferior a su tamaño. Esta energía absorbida es reemitida y tiene las características de una radiación de cuerpo negro a una temperatura T_d , multiplicada por un coeficiente de absorción, dependiente de la frecuencia.

Para concluir este apartado, la Figura 2.3-a muestra algunas fuentes brillantes en radio. Además de las fuentes tipo "A", (las primeras fuentes de radio emisión extraterrestre descubiertas, y que son las más brillantes), aparecen allí las indicadas con el prefijo 3C, que corresponde a fuentes del Tercer Catálogo de Cambridge de fuentes brillantes en radio, utilizadas usualmente como calibradores de flujo. La Figura 2.3-b contiene algunos de los distintos tipos de emisión continua presentadas muy sucintamente aquí, con sus distintos índices espectrales. Además del ya mencionado caso de Júpiter, se detecta radio emisión sincrotrónica en los núcleos activos de galaxia (AGN, por su sigla en inglés), donde las velocidades relativistas de los electrones, necesarias para generar emisión sincrotrónica, son producidas por acreción o por chorros de material hacia/desde el agujero negro supermasivo del AGN.

2.1.4. Líneas espectrales

Una comprensión cabal de los mecanismos de interacción a nivel microscópico entre la radiación electromagnética y la materia (moléculas, átomos, iones) sólo fue posible a partir del desarrollo de la mecánica cuántica. La cuantización de magnitudes como la energía y el momento angular, que implica que solo pueden admitir determinados valores discretos, fue fundamental para explicar la física de las líneas espectrales.

Las transiciones que dan lugar a líneas espectrales son por emisión o absorción de fotones, en cuyo caso hablamos de transiciones radiativas, o debido a colisiones entre partículas, en cuyo caso hablamos de transiciones colisionales. Las transiciones radiativas se subdividen a su vez en transiciones espontáneas de emisión, transiciones estimuladas de emisión y transiciones de absorción.

Comenzamos el análisis que sigue considerando electrones por motivos de mayor simplicidad, pero los conceptos y principios son igualmente aplicables a moléculas, como se verá más adelante.

Coefficientes de Einstein

Cuando un electrón se encuentra en un determinado estado excitado u , permanecerá en el mismo un tiempo antes de des-excitar a un estado energéticamente inferior l . La probabilidad (por unidad de tiempo) de que el electrón pase del estado u a l está dada por el coeficiente de Einstein, que suele denotarse A_{ul} [s^{-1}]. Por lo tanto, el tiempo de vida medio en el estado u vendrá dado por la suma de los coeficientes de Einstein de todas las posibles transiciones desde u a $l = u - 1, u - 2, \dots, 1$:

$$t_{life} = \left(\sum_{l=u-1}^1 A_{ul} \right)^{-1} \quad (2.17)$$

La emisividad j_ν , magnitud macroscópica cuyas unidades cgs son de $\text{ergs} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{Hz}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$, se vincula con A_{ul} de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$j_\nu = \frac{h\nu \cdot n_u \cdot A_{ul}}{4\pi} \cdot \phi_\nu \quad (2.18)$$

donde n_u es la densidad numérica de átomos en el estado excitado u y ϕ_ν es la función de perfil de línea. Este factor es necesario debido a los mecanismos de ensanchamiento de líneas espectrales que se mencionarán más adelante, que ocasionan que la emisión no es nula a frecuencias distintas de la frecuencia central de emisión, ν_0 . Una función de perfil de línea debe cumplir que $\int_{-\infty}^{+\infty} \phi_\nu d\nu = 1$. Son ejemplos de ello perfiles de Voigt y de Gauss.

La emisión estimulada ocurre cuando un electrón en un estado excitado u , pasa a un nivel energéticamente inferior l no de forma espontánea sino estimulado por un fotón de energía igual a la diferencia de energía ΔE_{ul} entre los estados u y l . De este modo, la radiación incidente es amplificada y en la parte de ondas de radio este fenómeno se denomina MASER, acrónimo (en inglés) de *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Una particularidad es que el fotón emitido tiene la misma fase que el incidente, por lo que la emisión es coherente. Para este caso, se utiliza la letra B para el coeficiente de Einstein respectivo, B_{ul} .

Para el caso de las transiciones de absorción los coeficientes de Einstein se denotan también con la letra B , aunque el orden de los subíndices es el inverso que el del coeficiente de Einstein de emisión estimulada: B_{lu} , para una transición del estado l al u .

Tanto en el caso de emisión estimulada como absorbida, la probabilidad de que un fotón incidente sea amplificado o absorbido, depende no solo de los coeficientes de Einstein respectivos, sino de la intensidad de la radiación incidente. El coeficiente de absorción κ_ν , ya introducido en 2.1.2, se vincula con los coeficientes de Einstein B_{ul} y B_{lu} de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\kappa_\nu = \frac{h\nu}{4\pi} \cdot (n_l B_{lu} - n_u B_{ul}) \cdot \phi_\nu \quad (2.19)$$

Capítulo 2. Fundamentos de radioastronomía: teoría e instrumentación

donde n_u y n_l son las densidades numéricas volumétricas (átomos por unidad de volumen) de átomos en los estados u y l , respectivamente.

La relación entre los coeficientes de Einstein puede derivarse fácilmente imponiendo la condición de equilibrio termodinámico (Ec. 2.11) y utilizando las ecuaciones 2.18 y 2.19:

$$A_{ul} = \frac{2h\nu^3}{c^2} \cdot B_{ul} \quad (2.20)$$

Los coeficientes "B" de Einstein se relacionan entre sí a través de la siguiente ecuación:

$$g_l \cdot B_{lu} = g_u \cdot B_{ul} \quad (2.21)$$

donde g_l y g_u son los pesos estadísticos de los niveles l y u , respectivamente. Estos pesos estadísticos están determinados por el grado de degeneramiento de cada nivel (de número cuántico principal n), es decir, del número de subniveles dados por los números cuánticos l , m_l y m_s del electrón.

Ensanchamiento de líneas espectrales

En el apartado anterior se vio que cuando un electrón que se encuentra en un estado excitado u , pasa a un estado energéticamente inferior l , un fotón es emitido cuya frecuencia está dada por $\Delta E/h$, donde ΔE es la diferencia de energía entre los estados u y l .

Ahora bien, las energías correspondientes a cada estado involucrado en esta transición, tienen una incertidumbre asociada, dada por el Principio de Incertidumbre de Heisenberg:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{2 \cdot \pi} \quad (2.22)$$

Este es uno de los mecanismos que ocasionan el ensanchamiento de las líneas espectrales en torno a una frecuencia central. El ensanchamiento debido a la incertidumbre del Principio de Heisenberg, es también llamado ensanchamiento natural. Los otros dos mecanismos que contribuyen al ensanchamiento de líneas espectrales son el ensanchamiento por presión y el ensanchamiento de Doppler. De los tres, es el de Doppler el más relevante en radioastronomía, y suele subdividirse en tres tipos: térmico, turbulento y macroscópico.

El ensanchamiento térmico es debido al movimiento térmico de las partículas (átomos, moléculas) que originan la línea espectral. La distribución de velocidades de las partículas de un gas sigue una distribución de Maxwell-Boltzmann, y la función de perfil de línea puede entonces escribirse así:

$$\phi_\nu = \pi \cdot \Delta\nu_D^{-1} \cdot e^{-\left[\frac{\nu-\nu_0}{\Delta\nu_D}\right]^2} \quad (2.23)$$

donde ν_0 es la frecuencia central de la línea, y $\Delta\nu_D$ es el parámetro de ensanchamiento de Doppler, dado por:

$$\Delta\nu_D = \left(\frac{\nu_0}{c}\right) \cdot \sqrt{\frac{2kT_k}{m}} \quad (2.24)$$

donde m es la masa de la partícula emisora y T_k es la temperatura cinética de las partículas.

La Ec. 2.24 es válida únicamente cuando el ensanchamiento es puramente térmico, típicamente hasta algunos km/s. Valores mayores de $\Delta\nu_D$ son indicativos de turbulencia en la fuente observada, y mayores ensanchamientos son evidencia de movimientos macroscópicos más regulares, como la rotación de un disco de gas, entre otros.

Frecuentemente se expresa el ancho de la línea no en términos del parámetro de ensanchamiento de Doppler $\Delta\nu_D$, sino a través de la anchura a mitad de altura (FWHM, por su sigla en inglés) $\Delta\nu_{FWHM}$. Como el perfil es gaussiano, es fácilmente demostrable que:

$$\Delta\nu_{FWHM} = 2 \sqrt{\ln 2} \cdot \Delta\nu_D \simeq 1,665 \cdot \Delta\nu_D \quad (2.25)$$

2.1. Radioastrofísica

Usualmente el ancho de la línea se expresa en unidades de km/s , a través de la siguiente conversión:

$$\Delta v_{FWHM} = \frac{c}{\nu_0} \cdot \Delta \nu_{FWHM} \quad (2.26)$$

No debe confundirse la frecuencia central de la línea observada, ν_0 en las Ec. 2.23, 2.24 y 2.26, con la frecuencia central en reposo. Esta última, que obtenemos de catálogos como *Lovas*, *JPL/NASA Molecular Database*, o *Cologne Database for Molecular Spectroscopy* (CDMS), es la frecuencia emitida en el marco de referencia del átomo o molécula. Esta coincide con la frecuencia central de la línea recibida únicamente si la componente radial de la velocidad de la fuente con respecto al observador es nula:

$$v_r^O = c \cdot \frac{\nu_e - \nu}{\nu} \quad (2.27)$$

donde ν_e es la frecuencia en reposo. En astronomía, la convención es tal que una velocidad radial positiva es cuando fuente y observador se alejan, por lo cual la frecuencia recibida ν es menor que la emitida ν_e .

En textos de radioastronomía puede encontrarse la siguiente expresión:

$$v_r^R = c \cdot \frac{\nu_e - \nu}{\nu_e} \quad (2.28)$$

que a veces es llamada la "definición de radio" del corrimiento Doppler, y que no difiere sustantivamente de la anterior, denominada "definición óptica", para $\nu/c \ll 0,01$.

En cualquier caso, debe indicarse el marco de referencia utilizado para la velocidad. En observaciones galácticas, el utilizado más comunmente es el Estándar de Reposo Local (LSR, por su sigla en inglés, ver Tabla 2.2). Existen dos variantes de LSR, el cinemático (LSRK) y el dinámico (LSRD), correspondientes al centro cinemático y dinámico, respectivamente. En casi todos los casos se utiliza LSRK y se utiliza LSR como sinónimo de LSRK ([NRAO, 2021a]). El software de reducción de datos radioastronómicos CASA utiliza LSRK como marco de referencia nativo, mientras que GBTIDL, desarrollado para reducción de datos del Robert C. Byrd Green Bank Telescope (GBT), permite seleccionar el marco de referencia desde topo- hasta galactocéntrico.

Transferencia radiativa de líneas espectrales

Partiendo de la solución a la ETR para el caso de medio homogéneo (Ec. 2.14), asumiendo que no hay radiación de fondo y que $\tau_\nu \ll 1$ (caso ópticamente delgado), se puede demostrar fácilmente que:

$$\int I_\nu d\nu \simeq \frac{h\nu}{4\pi} \cdot A_{ul} \cdot N_u \quad (2.29)$$

donde N_u es la densidad columnar (número de átomos por unidad de superficie) de átomos en el estado u . La densidad columnar es el resultado de integrar la densidad volumétrica $n(s)$ a lo largo de la línea vista:

$$N = \int_0^L n(s) ds \quad (2.30)$$

En el caso de un medio homogéneo, donde $n(s) = n$, la densidad columnar es simplemente el producto $n \cdot L$. La Ec.2.29 muestra que cuando no hay radiación de fondo, el medio es homogéneo y la emisión es ópticamente delgada, la integración de la línea espectral (con respecto a la frecuencia) permite estimar la densidad columnar de átomos en el estado superior de la transición. En el caso de un medio inhomogéneo, la Ec.2.29 permite estimar la densidad columnar promedio.

Capítulo 2. Fundamentos de radioastronomía: teoría e instrumentación

Nombre	Marco de referencia	Corrección	Amplitud máxima [km/s]
Topocéntrico	Telescopio	Ninguna	0
Geocéntrico	Tierra	Rotación terrestre	0.5
Heliocéntrico	Centro del Sol	Movimiento orbital terrestre	30
Estandar de reposo local (LSR)	CM de estrellas cercanas	Movimiento del Sol rel. a estrellas cercanas	20
Galactocéntrico	Centro de la Vía Láctea	Rotación de la Vía Láctea	230
Grupo Local Baricéntrico	CM de Grupo Local	Movimiento de Vía Láctea	100
Virgocéntrico	Centro del Supercluster Local de Virgo	Movimiento del Grupo Local	300
Radiación Cósmica de Fondo	CMB	Movimiento de Supercluster Local	600

Tabla 2.2: Algunos marcos de referencia utilizados para referir la velocidad de fuentes astronómicas ([NRAO, 2021a]).

El cociente (o ratio) poblacional n_u/n_l puede escribirse *siempre* en términos de una temperatura de excitación T_{ex} así:

$$\frac{n_u}{n_l} = \frac{g_u}{g_l} \cdot e^{-\frac{\Delta E_{ul}}{kT_{ex}}} \quad (2.31)$$

Resulta conveniente indicar la energía de los niveles superior o inferior en unidades de temperatura, lo cual permite determinar a priori si se trata de una transición de baja o alta temperatura.

Cuando el gas está en equilibrio termodinámico, la temperatura de excitación equivale a la temperatura cinética T_K del gas. La profundidad óptica τ_ν depende de la frecuencia, por lo tanto si aumenta la población de átomos en el estado u , la profundidad óptica aumenta en el *centro* de la línea (τ_0). En este caso, la intensidad en el centro de la línea, $I_\nu(\nu_0)$, es:

$$I_\nu(\nu_0) \simeq B_\nu(T_{ex}) \quad (2.32)$$

La expresión más genérica de la solución a la ETR en un medio homogéneo (Ec. 2.14) para el caso de líneas espectrales es:

$$I_\nu(s) = I_{\nu,0}e^{-\tau s} + B_\nu(T_{ex})(1 - e^{-\tau(s)}) \quad (2.33)$$

A partir de la definición de τ , y las ecuaciones 2.8 y 2.31, obtenemos la siguiente expresión para la profundidad óptica de la línea espectral:

$$\tau_\nu = \frac{h\nu}{4\pi} \cdot B_{lu} \cdot N_l \cdot (1 - e^{-\Delta E_{ul}/kT_{ex}}) \cdot \phi_\nu \quad (2.34)$$

El término entre paréntesis es llamado *corrección por emisión estimulada*. Ello se debe a que para una inversión en las poblaciones en u y l , es decir, $n_u > n_l$, que corresponde a una temperatura de excitación *negativa*, la profundidad óptica también es negativa, y se genera así una *amplificación* de la radiación de fondo ($e^{-\tau} > 1$).

Transiciones colisionales

Hasta aquí se ha descrito transiciones que involucran la interacción con *fotones*. Como se dijo al comienzo de la Sección 2.1.4, las transiciones que son fruto de interacciones entre otras partículas (átomos, moléculas o iones) son llamadas transiciones *colisionales*.

Supongamos que un átomo sufre colisiones con otras partículas, que llamaremos objetivo (pueden ser otros átomos, moléculas o electrones). Sea τ_{coll} el tiempo medio entre colisiones, v_{atom} la velocidad del átomo y l el camino libre medio. Entonces se cumple que:

$$l = v_{atom} \cdot \tau_{coll} \quad (2.35)$$

y la tasa de colisiones R_{coll} , que es el inverso de τ_{coll} , estará dada por:

$$R_{coll} = n_{target} \cdot \sigma_{coll} \cdot v_{atom} \quad (2.36)$$

donde σ_{coll} es el área efectiva de colisión, que expresa la probabilidad de ocurrencia de una colisión entre las partículas consideradas.

Para cuantificar la probabilidad de que una colisión transforme el estado energético de la partícula definimos los coeficientes de tasa colisional⁵ C_{lu} y C_{ul} , de modo tal que su producto con las densidades volumétricas del objetivo, n_{target} , y del estado correspondiente (n_l y n_u , respectivamente), es igual a la tasa de colisiones R_{coll} .

En el caso de una distribución de Maxwell-Boltzmann de las velocidades, los coeficientes C_{lu} y C_{ul} se vinculan entre sí mediante la ecuación:

$$\frac{C_{lu}}{C_{ul}} = \frac{g_u}{g_l} \cdot e^{-\frac{\Delta E_{ul}}{kT_K}} \quad (2.37)$$

Consideremos ahora el caso de un gas en el que sus átomos solamente sufren transiciones de un estado u a l y viceversa, tanto colisionales como radiativas. En una situación de equilibrio entre las transiciones de u a l y de l a u , es decir de equilibrio en n_u y n_l , podemos escribir:

$$n_l \cdot B_{lu} \cdot I_\nu + n_l \cdot n \cdot C_{lu} = n_u \cdot A_{ul} + n_u \cdot B_{ul} \cdot I_\nu + n_u \cdot n \cdot C_{ul} \quad (2.38)$$

Dividiendo esta ecuación entre n_l y despejando, obtenemos fácilmente la siguiente expresión para el cociente poblacional:

$$\frac{n_u}{n_l} = \frac{B_{lu}I_\nu + nC_{lu}}{A_{ul} + B_{ul}I_\nu + nC_{ul}} \quad (2.39)$$

Utilizando la definición de temperatura de radiación T_R (temperatura a la cual la función de Planck, $B_\nu(T_R)$, es igual a la intensidad I_ν), la relación entre los coeficientes de Einstein (Ec. 2.20 y 2.21) y la que vincula a los colisionales (Ec. 2.37), podemos reescribir la Ec. 2.39 y despejar el término exponencial:

$$e^{-\frac{\Delta E_{ul}}{kT_{ex}}} = \frac{A_{ul} \cdot \left[e^{-\frac{h\nu}{kT_R}} - 1 \right]^{-1} + nC_{ul} \cdot e^{-\frac{\Delta E_{ul}}{kT_K}}}{A_{ul} \left[1 - e^{-\frac{h\nu}{kT_R}} \right]^{-1} + nC_{ul}} \quad (2.40)$$

La Ec. 2.40 nos permite identificar dos escenarios bien diferentes. El primero, en el que las colisiones dominan y podemos despreciar los términos radiativos. En tal caso, la Ec. 2.40 se reduce a que $e^{-\frac{\Delta E_{ul}}{kT_{ex}}} \approx e^{-\frac{\Delta E_{ul}}{kT_K}}$, es decir, $T_{ex} \approx T_K$. En este caso, decimos que los niveles energéticos están *termalizados*.

En el segundo escenario dominan los procesos radiativos y ello conduce a que $T_{ex} \approx T_R$. La densidad n_{cr} a la cual las tasas de des-excitación radiativa y colisional son iguales se denomina densidad crítica:

⁵Se sigue la misma convención en la notación de subíndices que para los coeficientes de Einstein

Capítulo 2. Fundamentos de radioastronomía: teoría e instrumentación

$$n_{cr} = \frac{A_{ul}}{C_{ul}} \quad (2.41)$$

y depende de la temperatura cinética del gas T_k , ya que el coeficiente de tasa colisional C_{ul} depende de T_k . En otras palabras, para una determinada temperatura cinética, habrá una densidad n_{cr} del gas por encima de la cual los procesos colisionales comienzan a dominar los radiativos. Conforme aumenta esta densidad, la temperatura de excitación tiende a la temperatura cinética del gas, es decir, el ratio poblacional estará determinado por T_k . En el otro extremo, a densidades muy por debajo de la crítica, dominan los procesos radiativos y la temperatura de excitación tenderá a la temperatura de radiación.

Líneas espectrales en radio

Las líneas espectrales provenientes de fuentes astronómicas y observadas en la parte de ondas de radio del espectro electromagnético, se originan mayoritariamente por transiciones rotacionales de moléculas, electrónicas entre niveles de alto número principal n , y por transiciones hiperfinas en el estado fundamental del átomo. Para los últimos dos casos, el hidrógeno es el átomo que más frecuentemente origina este tipo de líneas, principalmente por ser el elemento más abundante del Universo. En los apartados que siguen se describe las principales características de cada tipo de línea.

Línea de 21 cm de hidrógeno

El estado fundamental del átomo de hidrógeno tiene dos subniveles energéticos, correspondientes a sus dos posibles momentos angulares netos expresados en el número cuántico F . La separación en energía entre el nivel $F=1$ (spin nuclear y del electron iguales a $+1/2$) y $F=0$ (spin del electron = $-1/2$) es de $5.9 \mu\text{eV}$, lo que en longitud de onda corresponde a 21 cm. Por esta razón, a la línea espectral originada en la transición $F=1-0$ de hidrógeno se le llama línea de 21 cm. Se trata de una transición cuyo coeficiente A de Einstein es de tan solo $2,87 \cdot 10^{-15} \text{ s}^{-1}$. El tiempo de vida medio en el estado $F=1$ es de 11 millones de años. Es decir que se trata de una transición muy improbable, pero por ser el hidrógeno el elemento más abundante en el Universo, es posible su detección.

El cociente poblacional entre uno y otro estado viene dado por:

$$\frac{N_{F=1}}{N_{F=0}} = 3 \cdot e^{-0,068/T_K} \quad (2.42)$$

A la temperatura cinética T_K en este caso suele denominarse también temperatura de spin T_S . Como el límite inferior de T_K está determinado por la temperatura de la radiación cósmica de fondo (2.73 K), ocurre generalmente que $T_K \gg 0,068$ y por lo tanto $N_{F=1} \sim 3N_{F=0}$. De aquí se deduce que $N_{F=1} \sim \frac{3}{4}N_H$, donde N_H es la densidad columnar *total* de hidrógeno. Aplicando este resultado a la Ec.2.29, obtenemos:

$$\int I_\nu \sim 1,62 \cdot 10^{-33} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \left(\frac{N_H}{\text{cm}^{-2}} \right) \quad (2.43)$$

Si reescribimos la Ec.2.43 en términos de la temperatura de brillo T_B definida en la Ec. 2.16, y despejamos la densidad columnar total de hidrógeno N_H , obtenemos:

$$N_H \sim 1,8 \cdot 10^{18} \cdot \text{cm}^{-2} \left(\frac{\int T_B \cdot d\nu}{\text{K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}} \right) \quad (2.44)$$

En esta ecuación hemos expresado el espectro en unidades de velocidad en lugar de frecuencia, lo cual es más común en observaciones de líneas espectrales.

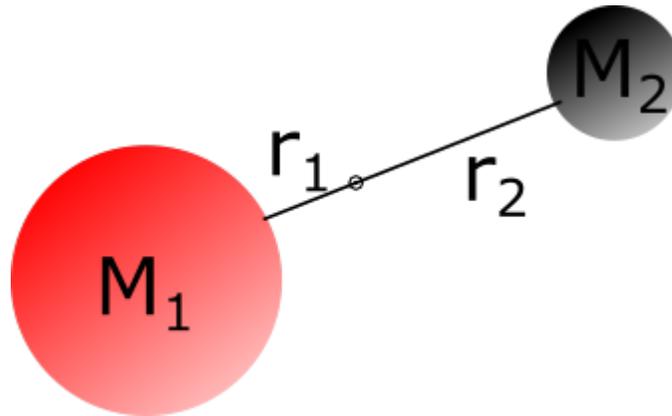


Figura 2.4: Molécula diatómica compuesta por átomos de masas M_1 y M_2 , a distancias del centro de masas r_1 y r_2 , respectivamente.

Líneas de recombinación de hidrógeno

Líneas moleculares de rotación

La detección del radical hidroxilo (OH) en el medio interestelar, en 1963, constituye un verdadero hito en la historia de la radioastronomía. Merece especial mención también la detección de monóxido de carbono (CO) en 2.6mm, por Wilson & Penzias, en 1970.

A partir de allí, nuevas moléculas fueron identificadas mediante la detección de líneas espectrales debidas a transiciones rotacionales. Para comprender la física de estas transiciones, comenzaré por el caso más simple de una molécula diatómica (2.4).

De mecánica clásica sabemos que la energía de este sistema está dada por:

$$E = \frac{1}{2} \cdot I\omega^2 = \frac{L^2}{2I} \quad (2.45)$$

Ahora, como de acuerdo a mecánica cuántica el momento angular L está cuantizado, así también los estados energéticos rotacionales de la molécula. La energía puede escribirse como:

$$E = J(J+1) \cdot \frac{h^2}{8\pi^2 I} \quad (2.46)$$

donde J es el número cuántico rotacional y representa el momento angular total, mientras que a $B = h/(8\pi^2 \cdot I)$ se le llama constante de rotación, y entonces se suele escribir la energía de la forma:

$$E = J(J+1) \cdot hB \quad (2.47)$$

Esta expresión es solo válida para rotores rígidos. Para moléculas reales la rotación genera un alargamiento de la distancia entre moléculas resultando en un aumento del momento de inercia y por ende una disminución de la energía, fenómeno denominado *distorsión centrífuga* [Snell et al., 2019].

En cualquier caso, las transiciones rotacionales permitidas deben cumplir que $\Delta J = \pm 1$, y entonces se cumple que la frecuencia ν de la transición está dada por:

$$\nu = 2J_u B \quad (2.48)$$

donde el subíndice u indica, como en transiciones electrónicas, el nivel energético superior de la transición. Esta expresión es válida para todas las moléculas lineales, para las cuales la rotación puede ser caracterizada por un solo número cuántico. Son ejemplos de moléculas lineales CO, HCN, HC_3N , y HC_5N .

Capítulo 2. Fundamentos de radioastronomía: teoría e instrumentación

Molécula	B ₀ [GHz]	ν [GHz]		
		J=1-0	J=2-1	J=3-2
CO	57.6356	115.2712	230.5424	345.8136
HCN	44.3158	88.6316	177.2632	265.8948
HC ₃ N	4.5491	9.0981	18.1962	27.2943
HC ₅ N	1.3313	2.6627	5.3253	7.9880

Tabla 2.3: Constantes rotacionales B₀ de moléculas abundantes en el medio interestelar, y frecuencias de algunas de sus transiciones rotacionales. Las frecuencias de la transición J=1-0 (ν=0) son de [NRAO, 2021b], mientras que el resto de valores fue calculado a partir de ellas mediante la Ec. 2.48.

Isotópologa	B ₀ [GHz]	Δν [MHz]		
		J=1-0	J=2-1	J=3-2
HCCC ¹⁵ N	4.4168	265	529	794
H ¹³ CCCN	4.4085	281	562	844

Tabla 2.4: Constantes rotacionales B₀ de isotópologas de HC₃N, y diferencia con respecto a las frecuencias correspondientes de la Tabla 2.3.

La Tabla 2.3 muestra sus constantes rotacionales y las frecuencias de alguna de sus transiciones rotacionales. Las cianopolinas son moléculas orgánicas de la forma HC_nN, con $n = 3, 5, 7, \dots$, y como puede apreciarse, tienen constantes rotacionales significativamente menores que CO o HCN, lo cual se debe a que sus momentos de inercia son significativamente mayores. Esto a su vez ocasiona que sus principales líneas rotacionales tienen longitudes de onda centimétricas, a diferencia del CO por ejemplo cuyas líneas son principalmente milimétricas (2.6mm y 1.3mm para J=1-0 y J=2-1, respectivamente) y aun submilimétricas (0.85mm para J=3-2).

Una molécula puede tener isotópos, que son moléculas formadas por isótopos (por ej., ¹³C o ¹⁷O) de alguno(s) de los átomos que la componen, con constantes rotacionales ligeramente distintas. A modo de ejemplo, la Tabla 2.4 muestra las constantes rotacionales de dos isotópologas de H¹²CCC¹⁴N, y la diferencia en frecuencia con respecto a esta última de las transiciones J=1-0, 2-1 y 3-2.

Para moléculas lineales, el coeficiente A de Einstein correspondiente a una transición de J+1 a J es:

$$A = \frac{64\pi^4}{3hc^3} \cdot \mu^2 \cdot \frac{J+1}{2J+3} \cdot \nu^3 \quad (2.49)$$

donde μ es el momento dipolar de la molécula.

Hasta aquí hemos hablado de moléculas lineales, que son aquellas cuyos estados de rotación pueden ser descritos con un solo número cuántico (J). Un subgrupo de ellas son las moléculas lineales simétricas, por ejemplo el H₂, OCO o HCCH. Estas moléculas no tienen momento dipolar eléctrico, y por lo tanto no presentan transiciones rotacionales permitidas. Por otro lado, existen dos grandes subgrupos de moléculas, las trompo-simétricas (en inglés *symmetric-top*) y las trompo-asimétricas (*asymmetric-top*). Las primeras tienen dos momentos de inercia y por ende, para describir sus estados energéticos, precisamos dos números cuánticos. El momento angular total J se complementa con su proyección sobre el eje de simetría, que se denota con la letra K. La energía de un estado (J,K) depende de K², por lo que cada estado K>0 degenera en ±K puesto que la energía es independiente del distinto sentido de rotación ([McHale, 2017]).

Las reglas para transiciones permitidas son $\Delta J = \pm 1$, y $\Delta K = 0$. Para una representación gráfica de la estructura energética de estas moléculas, suele utilizarse las escaleras K (en inglés *K-ladders*), en las que para cada valor de K (0,1,2,...) se indican los niveles J, en columnas adyacentes (ver Fig. 2.5).

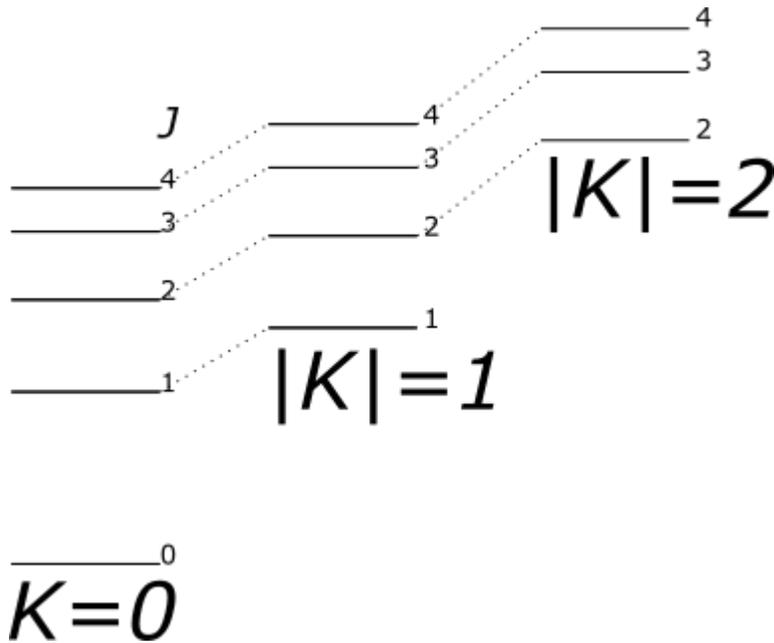


Figura 2.5: Diagrama de niveles energéticos con escaleras K en moléculas trompo-simétricas. En este ejemplo, aplicable a moléculas con forma de prolato, para un mismo J, la energía aumenta con K^2 . ([McHale, 2017]).

Transición	Frecuencia [MHz]
$J = 2 - 1, \nu = 0, K = 1$	36794.765
$J = 2 - 1, \nu = 0, K = 0$	36795.475

Tabla 2.5: Estructura hiperfina de la transición $J = 2 - 1$ de CH_3CN . $\nu = 0$ indica que el estado vibracional es el fundamental ([Pickett et al., 1998]).

El metil cianuro (CH_3CN) es una molécula trompo-simétrica con forma de prolato ([Müller, H. S. P. et al., 2009]), y por lo tanto su estructura energética rotacional se puede describir con una escalera K. Los cambios en K se deben únicamente a colisiones, por lo que la temperatura de excitación puede determinarse en principio a través del cociente entre componentes K de una misma transición J. Esto es posible pues al estar relativamente poco espaciadas entre sí en frecuencia, suelen detectarse a la vez dentro de un mismo ancho de banda, y el cociente elimina entonces las incertidumbres en parámetros de calibración, que afectan prácticamente por igual a todas las componentes dentro de una misma banda ([Rosero et al., 2013]). A modo de ejemplo, la transición $J = 2 - 1$ en el estado vibracional fundamental $\nu = 0$ se subdivide en dos transiciones de distinto K (0 y 1), como muestra la Tabla 2.5.

Tanto para moléculas lineales como trompo-simétricas existen dos mecanismos que producen una subdivisión de sus niveles energéticos. El primer mecanismo de subdivisión de niveles ocurre cuando la molécula tiene un momento angular electrónico neto en el estado fundamental, y el spin electrónico neto, interactuando con la rotación molecular, produce una subdivisión hiperfina. Este fenómeno ocurre en moléculas como CCH y CN.

El segundo ocurre cuando al menos uno de los átomos de la molécula tiene un spin neto I distinto de cero, similar a la división hiperfina del estado fundamental del átomo de hidrógeno que da lugar a la línea de 21 cm descrita anteriormente. Si $J \gg I$ los niveles rotacionales se subdivi-

Capítulo 2. Fundamentos de radioastronomía: teoría e instrumentación

den en $2I+1$ subniveles, mientras que si $J < I$ la subdivisión es en $2J+1$ subniveles, que se denotan con la letras $F=J \pm I$. La regla de transiciones permitidas es, además de $\Delta J = \pm 1$, que $\Delta F = 0, \pm 1$. Ejemplo de ello es la molécula lineal HCN, cuyo átomo de nitrógeno tiene un spin $I=1$. Esto ocasiona que cada nivel $J > 0$, tiene 3 subniveles ($F=0, 1, 2$). La transición $J=1-0$ de HCN, que se sitúa en los ≈ 88.6 GHz, tiene una subdivisión hiperfina en 3 líneas separadas ≈ 1 MHz, que se denominan *transiciones hiperfinas de cuadrupolo*.

Como ya se señaló en 2.1.4, la densidad crítica de un gas, n_{cr} , determina la densidad n_{gas} partir de la cual la población de niveles energéticos está descrita por una distribución térmica. Si la densidad del gas está muy por debajo de la densidad crítica, los procesos colisionales no son relevantes y las poblaciones están determinadas por excitaciones radiativas. En tal caso, la temperatura de excitación, T_{ex} , es aproximadamente igual a la de radiación, y las líneas de emisión son muy débiles y en general no observables.

Ahora bien, si $n_{cr} \gg n_{gas}$, entonces dominan las colisiones y $T_{ex} \approx T_k$. La densidad crítica está dada por el cociente entre el coeficiente de Einstein A_{ul} y el de tasa colisional C_{ul} (Ec. 2.41). Para moléculas lineales, este último no varía significativamente por lo que es A_{ul} el que determina n_{cr} de una determinada molécula, a través de su dependencia de μ^2 (Ec. 2.49). A modo de ejemplo, n_{cr} de la transición $J=1-0$ de CO es de 10^3 cm^{-3} , mientras que para HCN es de 10^6 cm^{-3} . Moléculas como HCN y otras con alta densidad crítica (HCO^+ , SiO, CS) son por lo tanto trazadoras de altas densidades de gas.

El CO es un caso único en el sentido de tener una densidad crítica muy baja y gran abundancia en relación a otras moléculas. Por ello, el centro de sus líneas de emisión puede asumirse ópticamente grueso y a partir de allí inferir la temperatura cinética del gas ($I(\nu_0) \approx B_\nu(T_k)$, Ec. 2.32).

En otros casos, podemos asumir el caso de línea ópticamente delgada y entonces inferir la densidad columnar, con la Ec. 2.29, que en términos de temperatura de brillo en función de velocidad es:

$$\int T_B \cdot dv = \frac{hc^3}{8\pi k\nu^2} \cdot N_u \cdot A_{ul} \quad (2.50)$$

Si la molécula está termalizada, $T_{ex} \approx T_k$, y para la densidad en el nivel i , n_i :

$$n_i \propto g_i \cdot e^{-\frac{E_i}{kT_k}} \quad (2.51)$$

Entonces, definimos la función de partición Z así:

$$Z = \sum n_i \cdot g_i \cdot e^{-\frac{E_i}{kT_k}} \quad (2.52)$$

Cuando $\frac{kT_k}{hB} > 1$, donde B es la constante rotacional de la molécula, se puede aproximar Z así:

$$Z \sim \frac{kT_k}{hB} + \frac{1}{3} + \frac{1}{15} \cdot \frac{hB}{kT_k} \quad (2.53)$$

La fracción de moléculas en el estado i es:

$$f_i = \frac{g_i \cdot e^{-\frac{E_i}{kT_k}}}{Z} \quad (2.54)$$

Entonces, si la temperatura cinética es conocida y la molécula está termalizada, podemos obtener la densidad columnar total así:

$$N_{TOT} = \frac{N_i}{f_i} \quad (2.55)$$

En otras palabras, la observación de una única transición de una molécula termalizada frecuentemente posibilita la determinación de la densidad columnar total de la molécula.

2.1.5. Método de diagramas rotacionales

Este método está detalladamente descrito y discutido en [Goldsmith and Langer, 1999]. Se trata de un método que permite, a partir de la detección de varias transiciones de una misma molécula, estimar tanto su densidad columnar total, como su temperatura rotacional.

El método de diagramas "poblacionales" o "rotacionales" permite establecer si la asunción de LTE es válida o no, así como determinar si la emisión es ópticamente delgada o gruesa. Por supuesto que si se obtiene que es válida la asunción de LTE, se obtiene la (única) temperatura de excitación que caracteriza *toda* la distribución de poblaciones de los distintos niveles energéticos.

Las ecuaciones 2.54 y 2.55 pueden reescribirse así:

$$\ln \frac{N_u}{g_u} = \ln(N) - \ln(Z) - \frac{E_u}{kT} \quad (2.56)$$

En otras palabras, el logaritmo de la densidad columnar del nivel superior es proporcional a su energía. Utilizando la Ec. 2.50, que aplica a líneas ópticamente delgadas, podemos reescribir la ecuación anterior incorporando la magnitud (observable) $W = \int T_A dv$:

$$\ln \frac{\gamma_u W}{g_u} = \ln(N) - \ln(Z) - \frac{E_u}{kT} \quad (2.57)$$

donde:

$$\gamma_u = \frac{8\pi k\nu^2}{hc^3 A_{ul}} \quad (2.58)$$

En otras palabras, la Ec. 2.57 nos dice que el logaritmo de la integral de línea W (observable) es lineal en E_u . Por lo tanto, si se detectan múltiples transiciones de una misma molécula, y se realiza un ajuste lineal a los puntos (E_u, W) , se obtiene de la ordenada en el origen la densidad columnar, y de la pendiente la temperatura.

2.1.6. Densidad columnar en LTE

Si no se tienen múltiples detecciones de transiciones de una misma molécula, pero sí de dos moléculas distintas lineales o no lineales (deben ser del mismo tipo ambas), entonces es posible estimar el cociente entre las densidades columnares.

Otra forma de escribir la Ec. 2.56 es de la siguiente manera, donde S es la intensidad intrínseca de la línea (*line strength*) y μ es el momento dipolar permanente:

$$\frac{N_u}{g_u} = \frac{3kW}{8\pi^3 \nu_0 S \mu^2} \quad (2.59)$$

Otra condición para la validez de la Ec. 2.59 es que la temperatura de excitación de la línea debe ser mucho mayor que la temperatura de brillo de fondo.

Partiendo de la Ecuación de Boltzmann (Ec. 2.31), que para seguir una notación consecuente con el desarrollo previo la reformulamos así:

$$\frac{N}{g} = \frac{N_0}{g_0} \exp\left(-\frac{E}{kT_{rot}}\right) \quad (2.60)$$

donde N_0 es la densidad columnar del estado fundamental, g_0 su degeneramiento, y E la energía del nivel superior por encima de la fundamental, podemos obtener una expresión para la densidad columnar total N^t :

$$\frac{N^t}{Z} = \frac{N}{g} \exp\left(\frac{E}{kT_{rot}}\right). \quad (2.61)$$

Para moléculas lineales la función de partición Z puede aproximarse así:

Capítulo 2. Fundamentos de radioastronomía: teoría e instrumentación

$$Z_{rot} \simeq \frac{kT_{rot}}{hB} \quad (2.62)$$

donde, como antes, B es la constante de rotación de la molécula. Si se conoce la temperatura de rotación, estas ecuaciones 2.59 y 2.61 son utilizadas para obtener densidades columnares totales.

Supongamos que detectamos dos líneas rotacionales de distintas moléculas 1 y 2. La Ecuación 2.61 muestra que si las moléculas tienen la misma temperatura rotacional, el cociente entre sus respectivas densidades columnares es:

$$\frac{N'_1}{N'_2} = \frac{Q_1}{Q_2} \frac{N_1}{g_1} \frac{g_2}{N_2} \exp\left(\frac{E_1 - E_2}{kT_{rot}}\right). \quad (2.63)$$

Si $E_1 - E_2 \ll kT_{rot}$, tal que $\exp\left(\frac{E_1 - E_2}{kT_{rot}}\right)$ es aproximadamente 1, la Ec. 2.63 se vuelve:

$$\frac{N'_1}{N'_2} = \frac{B_2}{B_1} \frac{N_{u1}}{g_{u1}} \frac{g_{u2}}{N_{u2}} \quad (2.64)$$

por lo que el cociente entre ambas densidades columnares se vuelve independiente de la temperatura.

Para moléculas no lineales, $Z_{rot} \simeq aT_{rot}^{1.5}$, donde el coeficiente a es particular de cada molécula. De modo que si ambas moléculas son no lineales y $E_1 - E_2 \ll kT_{rot}$, la Ec. 2.63 se vuelve:

$$\frac{N'_1}{N'_2} = \frac{a_2}{a_1} \frac{N_{u1}}{g_{u1}} \frac{g_{u2}}{N_{u2}} \quad (2.65)$$

donde, nuevamente, el cociente es independiente de la temperatura.

De modo que bajo las asunciones realizadas al comienzo de este subapartado (LTE, líneas ópticamente delgadas), si detectamos transiciones de dos moléculas distintas podemos hallar el cociente de sus densidades columnares totales, prescindiendo de la temperatura.

2.1.7. Máseres

Finalmente, un fenómeno importante ocurre cuando la tasa de emisión estimulada es mayor que la de absorción, lo cual resulta en una inversión de las poblaciones y una temperatura de excitación *negativa*.

Este fenómeno es el análogo en microondas al LASER y se denomina MASER por su sigla en inglés (*Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). La intensidad de una línea máser viene dada por:

$$T_0 = (T_{ex} - T_{bg}) \cdot (1 - e^{-\tau_0}) \simeq |T_{ex}| \cdot e^{|\tau_0|} \quad (2.66)$$

Esta amplificación puede ser muy significativa y dar lugar a temperaturas de línea tan elevadas como 10^{10} K. Dado que la extensión espacial de fuentes de máseres es pequeña, concentrándose en lo que se denomina *maser spots*, la densidad de flujo medida (o temperatura de antena, como se definirá en la sección que sigue) será moderada.

Para que pueda haber una inversión de poblaciones debe haber un mecanismo que la genere. En un esquema simplificado de dos niveles, interviene un tercer nivel, poblado por algún mecanismo que llamamos de *bombeo (pumping)*, desde el cual y hacia el cual hay transiciones de los otros dos. Para ilustrar el mecanismo de inversión de poblaciones entre un nivel inferior 1 y uno superior 2, considérese el esquema de la Figura 2.6.

Consideremos que el nivel 2 es poblado por excitaciones del 1 al 3 (a este último se lo refiere comunmente como *metaestable*), y desexcitaciones del 3 al 2, y llamemos a la tasa neta resultante $P12$. Luego, consideremos las excitaciones del 1 al 3 y las desexcitaciones del 3 al 2, y la tasa neta de desexcitación del 2 al 1 $P21$. Evidentemente, si $P12 > P21$ habrá una inversión de poblaciones y el efecto maser tendrá lugar.

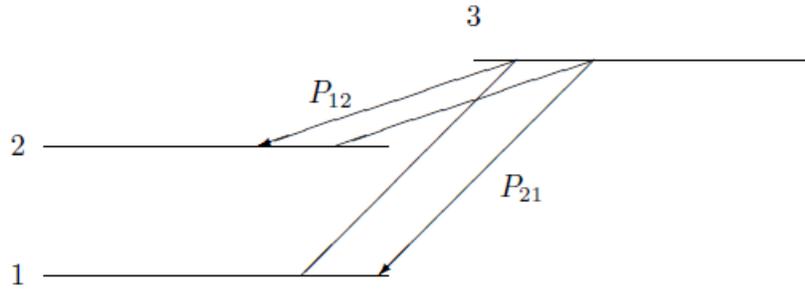


Figura 2.6: Esquema simplificado del mecanismo máser para dos niveles (Fuente de imagen: [Estalella and Anglada, 1999]).

Los mecanismos por los cuales puede poblarse el nivel 3 son esencialmente dos. Por un lado, tenemos los mecanismos radiativos, usualmente debido a un campo de fondo intenso en el IR que excita las moléculas al nivel metaestable (*IR pumping*), y de allí desexcitan a mayor tasa al 2 que al 1. Esto provoca la inversión de poblaciones y emisión amplificada de la transición 2-1. Por otro lado, la excitación al estado metaestable puede ocurrir debido a procesos colisionales (en inglés, *collisional pumping*).

Sea cual sea la causa del bombeo, resulta claro que la amplificación es respecto del campo de fondo. Los máseres por bombeo IR pueden ocurrir en una pléyade de entornos que generan este campo de fondo: regiones de formación estelar (SFR), AGN, choques SFR/nube, atmósferas estelares, discos circunestelares a estrellas gigantes M, entre otros ([Estalella and Anglada, 1999]). Asimismo, hay una variedad de moléculas que lo presentan: OH, H₂O, H₂CO, NH₃, CH₃OH, HCN, entre otras. Un ejemplo es el descrito en [Aalto et al., 2009], que involucra un disco compacto de polvo en torno al núcleo occidental de la galaxia Arp220, y la molécula involucrada en este ejemplo es HCN.

2.2. Instrumentos

Habiendo descrito de forma muy sintética y genérica los procesos que dan lugar a emisión de ondas de radio en el Universo y las características espectrales de dicha emisión, describo en esta sección algunos elementos teóricos básicos de teoría de antenas y de receptores.

2.2.1. Antenas

Una antena es esencialmente un dispositivo que recibe (o transmite) ondas de radio que se propagan en el espacio desde cierta dirección, y las confina a una guía de onda para su posterior tratamiento.

En cierto sentido, puede pensarse en general una antena como un filtro direccional en el espacio, por cuanto no recibe (o emite) de igual modo en todas direcciones.

Para caracterizar el comportamiento de una antena conviene comenzar por considerar campos electromagnéticos armónicos:

$$\vec{E}(x, y, z, t) = \text{Re}\{\mathbf{E}(x, y, z)e^{j\omega t}\}, \vec{H}(x, y, z, t) = \text{Re}\{\mathbf{H}(x, y, z)e^{j\omega t}\} \quad (2.67)$$

La potencia electromagnética instantánea que sale de una superficie cerrada S con normal $\hat{\mathbf{n}}$, está dada por:

Capítulo 2. Fundamentos de radioastronomía: teoría e instrumentación

$$P_t = \iint_S \mathbf{E} \times \mathbf{H} \cdot \hat{\mathbf{n}} dS \quad (2.68)$$

El producto vectorial dentro del integrando es el vector instantáneo de Poynting, cuyo sentido indica justamente el del flujo de potencia.

La potencia promedio, que es la integral de la instantánea en un período T dividido entre el período, se calcula a partir de la densidad promedio de energía \mathbf{W}_{av} .

$$P_{av} = \langle P_t \rangle = \iint_S \mathbf{W}_{av} \cdot \hat{\mathbf{n}} dS \quad (2.69)$$

Un caso particular de campos armónicos lo constituyen las ondas planas, para las que los campos eléctrico y magnético son perpendiculares entre sí, y perpendiculares a la dirección $\hat{\mathbf{z}}$ de propagación de la onda. Las ondas planas son una idealización teórica, pero la radiación proveniente de cualquier fuente astronómica puede ser considerada una onda plana.

En tal caso, podemos escribir el campo eléctrico de la siguiente forma:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_t e^{-jkz} = (E_x \hat{\mathbf{x}} + E_y \hat{\mathbf{y}}) e^{-jkz} \quad (2.70)$$

y el magnético:

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\eta} \hat{\mathbf{z}} \times \mathbf{E} \quad (2.71)$$

donde $\eta = \sqrt{\mu\epsilon}$ es la impedancia del medio. Si una onda de estas características incide en una superficie conductora, que en el contexto de teoría de antenas en general podemos considerar como un conductor eléctrico perfecto (PEC, por su sigla en inglés), se inducirá sobre esta una corriente \mathbf{J} . Si ese conductor es un conductor cilíndrico delgado vertical y perpendicular a la dirección de propagación, saliendo de un plano horizontal (conductor) a tierra, que se conoce como monopolo, se inducirá en el conductor vertical una corriente que dará lugar a una tensión (voltaje) entre conductor y plano, siempre que el largo l del conductor que sale del plano sea $l \simeq \lambda/4$.

Cuando una onda plana incide en el reflector principal de una antena, que es una superficie conductora, podemos utilizar el método de óptica geométrica (GO, por su sigla en inglés) que presupone que la onda se propaga en el espacio a lo largo de trayectorias rectilíneas. De acuerdo a este método, la onda incidente se refleja en la superficie reflectora de acuerdo a la ley de reflexión de Snell. Si la superficie es un paraboloide, una onda incidente cuya dirección de propagación es paralela al eje del paraboloide convergerá en su punto focal. Como se verá más adelante, la calidad de esta superficie, en términos de cuánto se desvía de un paraboloide teórico, limita su frecuencia superior de operación.

En el punto focal de este reflector principal puede ubicarse una segunda antena tipo corneta o bocina (feeder o *feedhorn*) terminada en una guía de onda que confina y transmite la señal eficientemente a un receptor. O bien puede ubicarse en el foco un segundo reflector (llamado *subreflector*) que redirige la onda reflejada del reflector principal hacia su parte anterior, en donde sí se ubica el feeder. En el primer caso hablamos de un diseño de foco primario, en el segundo de tipo Cassegrain.

Volviendo a la Ec. 2.70, podemos descomponer el campo eléctrico en una componente que llamaremos co-polar (E_{co}) y otra que llamaremos cruzada (E_{xp}).

$$\mathbf{E} = (\mathbf{E}_{co} \hat{\mathbf{c}}\mathbf{o} + \mathbf{E}_{xp} \hat{\mathbf{x}}\mathbf{p}) e^{-jkz} \quad (2.72)$$

La curva que describe en una posición z determinada la variación armónica del vector del campo eléctrico determina su polarización. Si el versor $\hat{\mathbf{c}}\mathbf{o}$ coincide con $\hat{\mathbf{x}}$, el versor $\hat{\mathbf{x}}\mathbf{p}$ será $\hat{\mathbf{y}}$. En tal caso hablamos de polarización lineal. En general, cuando la variación del campo eléctrico

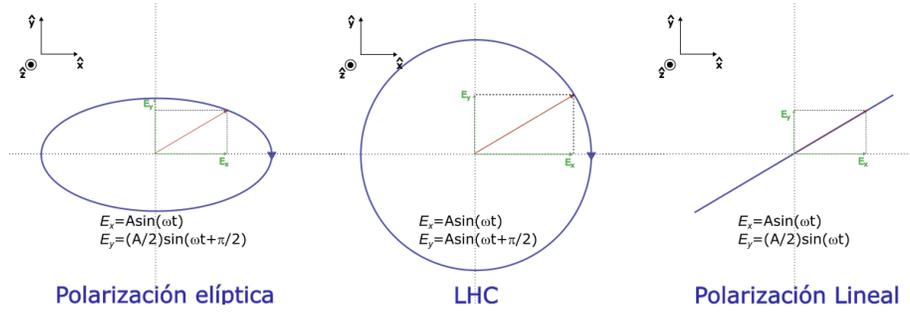


Figura 2.7: Polarizaciones elíptica izquierda, circular izquierda y lineal.

ocurre sobre una recta en el plano xy hablamos de polarización lineal. Si la curva que describe el campo eléctrico es una circunferencia, hablamos de polarización circular, que es un caso particular de polarización elíptica.

Si la componente y del campo eléctrico oscila con la misma fase que la componente x (Ec. 2.70), la polarización es lineal. Si la oscilación en uno y otro eje está desfasada $\pi/2$ rad, tendremos polarización elíptica, y si además las amplitudes son iguales, la polarización será circular. Esto se ilustra en la Figura 2.7.

Por lo tanto, una de las formas de *realizar* una polarización circular es a partir de dos polarizaciones lineales ortogonales desfasadas 90 grados, haciéndolas ingresar a las salidas de 0° y -90° , respectivamente, de un divisor de potencia híbrido 3dB ([Kildal, 2000]).

Si una antena transmite una onda polarizada, como es el caso de las antenas de comunicaciones satelitales en banda C tipo la 3A o 2A de la ETM, obviamente que el versor "copolar" será el correspondiente a la polarización generada, que del lado de la recepción es la deseada. En tales casos, lo deseado es minimizar la componente cruzada. Es posible cuantificar el desempeño de la antena en lo que refiere a polarización utilizando o bien el cociente axial (en inglés, *axial ratio*, Ec. 2.73), o bien el nivel relativo de polarización cruzada (en inglés, *relative cross-polar level*, Ec. 2.74).

$$AR = 10 \log \left| \frac{E_{MAX}}{E_{MIN}} \right|^2 = 10 \log \left[\frac{|E_{co}| + |E_{xp}|}{|E_{co}| - |E_{xp}|} \right]^2 [dB] \quad (2.73)$$

$$XP_{dB} = 10 \log \left| \frac{E_{xp}}{E_{co}} \right|^2 \quad (2.74)$$

Habiendo introducido estos conceptos, se puede definir la función de campo lejano de una antena (*far field function*), $\mathbf{G}(\theta, \phi)$, a partir de expresar el campo eléctrico en coordenadas polares:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{1}{r} e^{-jkr} \cdot \mathbf{G}(\hat{\mathbf{r}}) = \frac{1}{r} e^{-jkr} \cdot \mathbf{G}(\theta, \phi) \quad (2.75)$$

Esta función $\mathbf{G}(\theta, \phi)$ puede a su vez descomponerse en una componente copolar y una de polarización cruzada, $\mathbf{G}_{co}(\theta, \phi)$ y $\mathbf{G}_{xp}(\theta, \phi)$, respectivamente.

Se demuestra fácilmente que la densidad promedio de energía radiada \mathbf{W}_{av} (Ec. 2.69) es:

$$\mathbf{W}_{av} = \frac{1}{2} \frac{1}{\eta r^2} |\mathbf{G}(\theta, \phi)|^2 \hat{\mathbf{r}} \quad (2.76)$$

A partir de esto, definimos la intensidad $U(\theta, \phi)$ de radiación como la densidad de energía radiada por unidad de ángulo sólido:

$$U(\theta, \phi) = r^2 (\mathbf{W}_{av} \cdot \hat{\mathbf{r}}) = \frac{1}{2\eta} |\mathbf{G}(\theta, \phi)|^2 = \frac{1}{2\eta} [|\mathbf{G}_{co}(\theta, \phi)|^2 + |\mathbf{G}_{xp}(\theta, \phi)|^2] \quad (2.77)$$

Capítulo 2. Fundamentos de radioastronomía: teoría e instrumentación

La representación gráfica de $|G_{co}(\theta, \phi)|^2$ normalizada de algún modo (o bien con respecto a alguna dirección de referencia, usualmente $\theta = 0$, o bien respecto a una emisión isotrópica de igual potencia total), se llama *patrón de radiación*. Este patrón expresa pues cuánta densidad de potencia está radiando la antena en una dirección determinada, con respecto a alguna referencia. Debido al teorema de reciprocidad de antenas, expresa igualmente la porción de radiación detectada en una determinada dirección con respecto a una detección isotrópica.

El patrón de radiación de antenas simples, como monopolos, dipolos y bocinas puede obtenerse de forma analítica. Pero aún en diseños más complejos podemos utilizar expresiones analíticas relativamente simples que aproximan razonablemente bien el haz principal de la antena. Ejemplos de estas funciones son $e^{-(\theta/\theta_0)^2}$, $\cos^n(\theta)$ y $[\text{sen}(k\theta)/(k\theta)]^2$. Por ejemplo, una iluminación gaussiana, genera un patrón gaussiano ([Marr et al., 2015]).

A partir de la función de campo lejano copolar definimos la *ganancia directiva* como la normalización de la intensidad radiada en una dirección dada (θ, ϕ) sobre la intensidad de un radiador isotrópico con la misma potencia total P :

$$\mathbf{D}_{co}(\theta, \phi)_{dBi} \equiv 10 \log \left[\frac{|G_{co}(\theta, \phi)|}{|G_{ISO}|} \right]^2 = 10 \log \left[\frac{4\pi}{P} |G_{co}(\theta, \phi)|^2 \right] \quad (2.78)$$

El valor de la ganancia directiva en la dirección de máxima radiación ($\theta = 0, \phi = 0$, para haces centrados) se llama *directividad*, y es un parámetro clave en caracterización de antenas:

$$(\mathbf{D}_0)_{dBi} = 10 \log \left(\frac{4\pi}{P} |G_0|^2 \right) \quad (2.79)$$

donde

$$G_0 = G_{co}(0, 0) \quad (2.80)$$

para haces centrados, de lo contrario

$$G_0 = G_{co}(\theta, \phi)_{max} \quad (2.81)$$

El ancho del haz de una antena es definido a partir de la diferencia angular entre dos niveles de igual ganancia directiva, simétricos con respecto a G_0 . Así por ejemplo, si el nivel al que se hace referencia es el de 3dB por debajo del máximo, hablamos del ancho 3dB del haz, o más comunmente, el ancho a altura mitad o ancho de haz de mitad de potencia (en adelante, HPBW, por su sigla en inglés).

El HPBW constituye uno de los parámetros fundamentales en la caracterización de una antena. También lo es la *ganancia absoluta*, cuya definición es similar a la de la directividad, pero en lugar de considerar la potencia EM radiada (P en la Ec. 2.79) se considera la potencia entregada al puerto de entrada de la antena, con lo cual intervienen en su definición la eficiencia de radiación (η_{rad}) y la eficiencia de polarización (η_{pol}):

$$G_0 = \eta_{rad} \eta_{pol} \cdot D_0 \quad (2.82)$$

La eficiencia de radiación, a su vez, se define como el cociente entre la potencia radiada y la entregada al puerto de entrada a la antena, y es el producto de una eficiencia de transmisión $\eta_r = 1 - |r|^2$, donde r es el coeficiente de reflexión, y una eficiencia η_{ohm} que refleja las pérdidas óhmicas en las paredes de la antena.

La directividad máxima disponible de una antena está dada por:

$$D_{MAX} = \frac{4\pi}{\lambda^2} \cdot A \quad (2.83)$$

donde A es la apertura de la antena, que puede ser la apertura real, física, como en bocinas, o virtual, como sucede en un array.

2.2. Instrumentos

Un concepto muy utilizado es el de área efectiva A_{eff} , definida como el cociente entre la potencia recibida en el puerto de entrada de la antena, y la densidad de potencia de la onda plana incidente. Se demuestra fácilmente que el área efectiva es:

$$A_{eff} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot G_0 \quad (2.84)$$

En función de ello, se define la *eficiencia de apertura* η_{ap} como el cociente entre la directividad de la antena y la máxima directividad D_{MAX} posible dada por la Ec. 2.83.

Para antenas reflectoras, esta eficiencia es factorizada a su vez en un factor de eficiencia de "derrame" η_{spill} (en inglés *spillover efficiency*), de iluminación η_{ill} , y de fase.

La Ec. 2.82 puede ser reescrita de forma siguiente:

$$G_0 = \eta_{ant} \cdot D_{MAX} \quad (2.85)$$

donde la eficiencia de la antena η_{ant} es el producto de las eficiencias de radiación, óhmica, de polarización y de apertura.

Para antenas reflectoras, el tamaño angular del haz principal de la antena suele caracterizarse mediante el FWHM del lóbulo principal, y se vincula con el diámetro físico del reflector D según la Ec. 2.86.

$$\theta_{HPBW} = k \cdot \frac{\lambda}{D} \quad (2.86)$$

Este coeficiente está vinculado a la iluminación del reflector principal por parte del feeder. El cociente entre la capacidad de coleccionar energía por unidad de superficie entre el centro y el borde de la antena se denomina *edge-taper*. Para un feeder que ilumina el reflector principal de forma uniforme, "k" vale 1.02. Sin embargo, una iluminación uniforme genera como contrapartida pérdidas por derrame demasiado altas. Se puede trunca la iluminación en los bordes del reflector pero esto genera lóbulos secundarios relativamente importantes, lo cual no es deseable pues entonces se recoge radiación no deseada del entorno. Un *edge-taper* alto (gran atenuación en los bordes con respecto al centro) minimiza los lóbulos secundarios, pero reduce el área efectiva de la antena. Un *edge-taper* bajo aumenta el área efectiva al costo de aumentar lóbulos secundarios. Un compromiso que optimiza el área efectiva de la antena es el denominado *10dB-taper*, que se corresponde con un k=1.15.

Es posible también estimar a partir del HPBW el área efectiva de la antena aproximando el ángulo sólido del lóbulo principal, Ω_{mb} , al de la antena, Ω_A , y utilizando el teorema fundamental de antenas:

$$\Omega_A = \frac{\lambda^2}{A_{eff}} \simeq \frac{\pi}{4\ln(2)} \cdot \theta_{FWHM}^2 \quad (2.87)$$

De aquí puede despejarse entonces el área efectiva:

$$A_{eff} = \frac{4\ln(2)\lambda^2}{\pi \cdot \theta_{FWHM}^2} \quad (2.88)$$

2.2.2. Receptores

Un sistema de recepción en radioastronomía suele subdividirse en una parte llamada (*front-end*) y una llamada *back-end*. Sus nombres se deben a su ubicación física: el *front-end* está ubicado junto a la antena, justo después del feeder, mientras que el *back-end* se ubica comúnmente en la sala de control principal, o "de ciencia" (*science room*).

El *front-end* es esencialmente la parte superheterodina del receptor, como muestra la Figura 2.8. Está compuesto por un amplificador de bajo ruido (LNA), un oscilador local (LO), un mixer o mezclador y finalmente una etapa de amplificación y filtrado paso bajo. A la señal proveniente

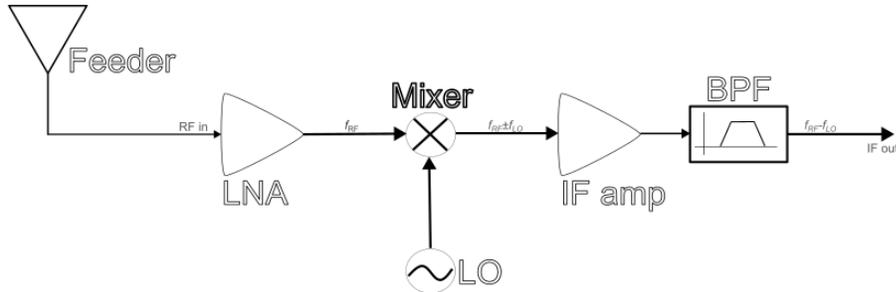


Figura 2.8: Esquema básico de un receptor superheterodino.

del feeder y amplificada por el LNA se la suele llamar de radiofrecuencia (RF), y a la saliente de la mezcla de la señal RF con la del LO se la llama de frecuencias intermedias (IF).

El funcionamiento del receptor superheterodino se basa en la propiedad de multiplicación (también llamada de modulación) de la transformada de Fourier:

$$\mathcal{F}\{x \cdot y\} = \frac{1}{2\pi} X(\omega) * Y(\omega) \quad (2.89)$$

Es decir que un producto en el dominio temporal se transforma en la convolución de las transformadas de Fourier de los factores, en el dominio espectral.

Esta propiedad es muy conveniente cuando se desea desplazar un contenido espectral determinado a frecuencias más bajas, lo cual ocurre cuando el rango de frecuencias RF es demasiado alto como para transportarlo de forma costoefectiva en líneas de transmisión a lo largo de decenas o cientos de metros.

Y es que las pérdidas en un cable coaxial aumentan con la frecuencia, y se vuelven inadmisiblemente altas ya en banda X o incluso C, dependiendo de la aplicación. Por otro lado, las guías de onda resultan líneas de transmisión utilizadas convenientemente para frecuencias altas, dadas sus pérdidas menores comparado al coaxial, pero son de mayor costo y por otro lado sus aberturas son de tamaño comparable a la longitud de onda, por lo que resultan imprácticas para frecuencias bajas.

De modo que, al igual que en comunicaciones satelitales, las líneas de transmisión utilizadas en radioastronomía para RF son guías de onda, mientras que en IF se utiliza cable coaxial.

Volviendo al receptor superheterodino, su función es pues bajar de RF a IF y ello se logra multiplicando la señal RF con una señal moduladora que es la producida por el LO. Para ilustrar su funcionamiento, consideremos una señal RF con una única componente f_{RF} ($s(t)$ en la Figura 2.9). Un LO genera un senoide a una frecuencia $f_{LO} < f_{RF}$ que a su vez abre y cierra un conjunto de switches, produciendo la señal $p(t)$ en la Figura 2.9. El producto $r(t)$ de ambas señales es generado en el mezclador, y las transformadas de Fourier de estas tres señales se muestran en la Figura 2.10.

En ese ejemplo, $f_{RF} = 11,5\text{GHz}$, y $f_{LO} = 10\text{GHz}$. Como se aprecia en el espectro de $r(t)$, aparece una componente a frecuencias bajas (1.5 GHz) que es la diferencia entre f_{RF} y f_{LO} . En otras palabras, se mapeó la frecuencia alta a un valor más bajo, fácilmente transmitible en un cable coaxial.

El espectro $R(\omega)$ de $r(t)$ también muestra otras componentes que son múltiplos de f_{RF} y

2.2. Instrumentos

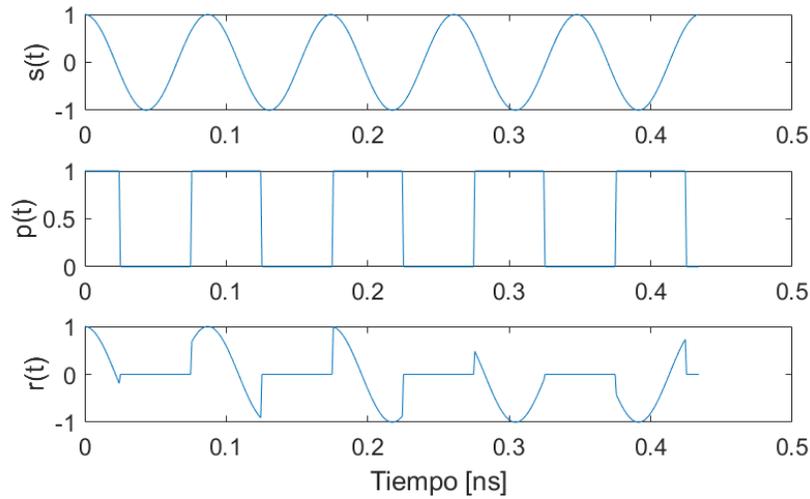


Figura 2.9: Esquema de señales que intervienen en la modulación en un receptor superheterodino: $s(t)$ representa la señal RF, $p(t)$ la moduladora y $r(t)$ el producto de ambas.

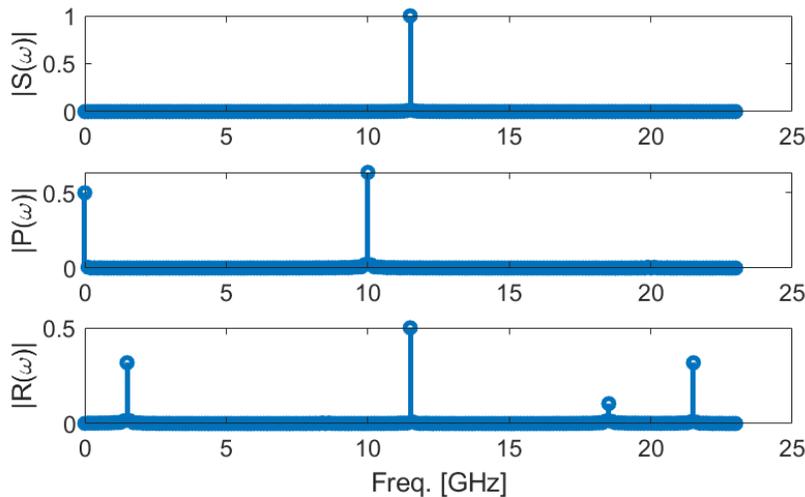


Figura 2.10: Transformadas de Fourier de las señales que intervienen en la modulación en un receptor superheterodino.

de $f_{RF} + f_{LO}$. Como estos productos no son deseados, a la salida del mixer se incluye, primero una etapa de amplificación en IF, y luego un filtro paso banda (o paso bajo) que elimina estas componentes no deseadas, dejando solamente la diferencia entre la RF y la LO.

En suma, la frecuencia RF es mapeada a su diferencia con la frecuencia LO. Si el mezclador es simple, la diferencia absoluta se mapea a una misma frecuencia intermedia. Es decir, $f_{RF} = f_{LO} + f_{IF}$ se mapea a la misma frecuencia (f_{IF}) que $f_{RF} = f_{LO} - f_{IF}$. Aquí hablamos de mezcladores de banda doble (*double-sideband mixers*).

Sin embargo, puede ocurrir que este efecto no sea deseado y queramos mapear solo la banda

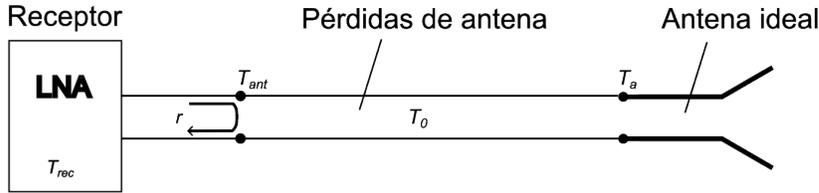


Figura 2.11: Diagrama de bloque de receptor conectado a antena, para ilustrar la cuantificación del ruido (Fuente de figura: [Kildal, 2000]).

a un lado de la f_{LO} . Los mezcladores que logran esto y que son más utilizados para el estudio de líneas espectrales, se llaman en inglés *single-sideband mixers*.

Después del filtro paso banda en IF la señal es llevada en coaxial hasta lo que se denomina el "cuarto de ciencia", donde se encuentra el *back-end* del receptor.

Conceptualmente, el *back-end* está compuesto por un filtro paso banda que define claramente el rango de frecuencias cuya potencia vamos a medir, por medio de un detector cuadrático (*square-law detector*). El detector cuadrático obedece su nombre a que la potencia de una onda electromagnética es proporcional al cuadrado de la magnitud del campo eléctrico, y se realiza normalmente con diodos que producen una corriente proporcional al cuadrado del campo eléctrico. Esta corriente se pasa por una resistencia conocida y el voltaje $V(t)$ medido, por ley de Ohm, será proporcional a la corriente y por ende al cuadrado del campo eléctrico.

Si consideramos una onda EM con una única componente, $E(t) = E_0 \cdot \cos(\omega t)$, el $V(t)$ medido será proporcional a $E^2(t) = E_0^2 \cdot \cos^2(\omega t) = \frac{1}{2} E_0^2 \cdot (1 + \cos(2\omega t))$. Esta señal es pasada por un filtro paso bajo para eliminar las oscilaciones de alta frecuencia ($= 2\omega$) y mantener solamente el valor DC ($E_0^2/2$).

Usualmente se escribe el voltaje de un detector cuadrático de la siguiente forma:

$$V = \alpha P \quad (2.90)$$

donde α es la *responsividad* del detector.

2.2.3. Ruido

La Figura 2.11 muestra un sistema compuesto por una antena y un receptor.

En este esquema se ilustra la potencia de la radiación que ingresa a la antena y es entregada a su puerto de entrada, a través de lo que denominamos *temperatura de antena* (T_a). Todas las fuentes de ruido debido a componentes en la cadena de recepción, conforman el ruido total del sistema y lo cuantificamos a través de la *temperatura de ruido*, T_N . Esta última se vincula con la potencia del ruido P_n en el sistema mediante:

$$P_n = kT_N \Delta\nu \quad (2.91)$$

donde k es la constante de Boltzmann y $\Delta\nu$ el ancho de banda del sistema.

En una cadena de componentes que tienen ganancias G_i y temperaturas de ruido $T_{N,i}$ el ruido total se vincula a cada contribución individual de la siguiente forma:

$$T_N = T_{N,1} + \frac{T_{N,2}}{G_1} + \frac{T_{N,3}}{G_1 \cdot G_2} + \dots \quad (2.92)$$

2.2. Instrumentos

Esta temperatura de ruido total es la *temperatura de ruido del receptor*, y en la ecuación intervienen tanto ganancias como pérdidas, que son ganancias < 1 . La ecuación precedente explicita también la importancia de que la temperatura de ruido del primer elemento ($T_{N,1}$), es decir el LNA, sea lo más baja posible.

Ahora bien, lo que detectamos no es solamente la fuente de interés y el ruido de componentes de la cadena de recepción, sino que la antena en sí misma contribuye con señales no deseadas. En particular, la radiación que detecta la antena no es solamente la proveniente de nuestra fuente de interés, sino también la del cielo de fondo, la de fuentes de RFI (ver Capítulo 4), la radiación del suelo que recogen los lóbulos laterales del patrón de radiación. Asimismo, hay pérdidas de retorno en la interfaz feeder/LNA, etc. Toda esta radiación no deseada, incluyendo el ruido generado por nuestro receptor, la denominamos ruido de sistema y la cuantificamos con la *temperatura del sistema*, T_{sys} .

Utilizando la Ec. 2.90, podemos vincular el voltaje medido por el detector cuadrático con las temperaturas de antena y de ruido:

$$V = \alpha G k \Delta \nu (T_{sys} + T_a) \quad (2.93)$$

Para eliminar el bias introducido por el ruido, se realizan mediciones *switcheadas*, es decir, mediciones que incluyen la fuente astronómica (V_{on}) y que no la incluyen (V_{off}), y esto a su vez se puede lograr de distintas maneras.

Una es apuntando la antena hacia una posición mayor que un HPBW fuera de la fuente (pero no muy lejos de la misma), en lo que se conoce como *position switching*. También puede en algunos casos moverse el subreflector de la antena, y hablamos de *nod-switching* o *beam-switching*. En mediciones con espectrómetro puede hacerse *frequency switching*, en cuyo caso lo que se hace es "mover" la(s) línea(s) detectada a distintos canales del espectrómetro, de manera de tener todos los canales en modo "off".

Cuando la fuente no está incluida en la señal, obtenemos un voltaje V_{off} , de modo que:

$$V_{on} - V_{off} = \alpha G k \Delta \nu T_a \quad (2.94)$$

A primera vista, puede parecer que el obtener una temperatura de antena a partir de mediciones *switcheadas* sea trivial, utilizando la Ecuación 2.94. Sin embargo, debido a las fluctuaciones de la ganancia neta del sistema y de la responsividad, el flujo que se obtenga de aplicar esta ecuación y valores nominales de estos parámetros, no será muy precisa. Para minimizar el efecto de estas fluctuaciones de ganancia y responsividad, se utiliza la técnica conocida como *switcheo de Dicke*, en honor a su creador Robert Dicke.

En esta técnica se dispone de una fuente de ruido, usualmente un diodo de ruido que produce una densidad de potencia de ruido conocida, lo que se traduce en una temperatura de ruido conocida, que llamamos temperatura de calibración, T_{cal} .

La técnica aquí consiste en *switchear* entre una parte de cielo sin fuentes, y el diodo de ruido. Cuando medimos cielo medimos V_{off} , y cuando medimos ruido medimos V_{cal} , y ambos se vinculan mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{V_{cal}}{V_{off}} = \frac{T_{cal} + T_{sys}}{T_{sys}} \quad (2.95)$$

lo cual puede reescribirse como:

$$T_{sys} = \frac{V_{off}}{V_{cal} - V_{off}} T_{cal} \quad (2.96)$$

Una vez que se dispone de la temperatura del sistema, un par de mediciones "on" y "off" apuntando a la fuente y fuera de ella, se obtiene de forma similar:

$$T_a = \frac{V_a - V_{off}}{V_{off}} T_{sys} \quad (2.97)$$

Capítulo 2. Fundamentos de radioastronomía: teoría e instrumentación

Una ecuación fundamental en radioastronomía, cuya derivación puede encontrarse en cualquier texto fundamental de radioastronomía (ver por ejemplo [Kraus, 1986], [Marr et al., 2015], [Wilson et al., 2013]), es la denominada ecuación del radiómetro, que vincula a la temperatura del sistema con las variaciones σ_n en el ruido, que en última instancia es lo que limita la sensibilidad de nuestro sistema:

$$\sigma_n = \frac{T_{\text{sys}}}{\sqrt{\Delta t \Delta \nu}} \quad (2.98)$$

donde Δt es el tiempo de integración de la medición, y $\Delta \nu$ es el ancho de banda del receptor.

Esta ecuación pone de relieve la importancia de mantener la temperatura de sistema lo más baja posible.

Capítulo 3

Infraestructura de la ETM

En este capítulo se presenta el conjunto de información técnica de las antenas de la ETM que pueden ser utilizadas para radioastronomía, por estar en desuso. Ellas son la 2A (32 m), 3A (16.4m) y 106 (4.2m).

Cada una presenta desafíos particulares y usos potenciales distintos o en todo caso complementarios, y pueden conformar a futuro la infraestructura de un radioobservatorio, co-localizado con infraestructura para servicios satelitales. Resulta claro que el principal uso de la 106 sería educativo, dado su porte, simplicidad de operación y versatilidad. Pero aún antes de emprender la reconversión de la 3A o más a futuro aún la 2A, es posible también realizar ciencia con este instrumento.

En los apartados que siguen se brinda toda la información técnica recabada de cada una, punto de partida esencial para cualquier proyecto de reconversión.

3.1. Antena 2A

Una vista general de la antena 2A se muestra en la Figura 3.1. Antes de detallar cada subsistema, y a modo de contexto, se brinda un breve racconto histórico de las tareas realizadas en el período 2017-2019.

3.1.1. Mantenimiento correctivo 2017-2019

En 2017, el subreflector se desprendió de su estructura de soporte por haberse llenado de agua a través de una filtración, cayendo luego sobre el reflector principal (Figura 3.2).

El sistema de movimiento de la antena en acimut es del tipo *wheel and track*, que se aprecia en la Figura 3.3.

A los efectos de determinar si la reconversión era técnicamente factible, debía determinarse primeramente si era posible reparar el sistema de lubricación del tornillo de elevación. Para ello, se disponía de filtros y bomba de lubricación de repuesto (Figura 3.4). Luego de cambiar la bomba de lubricación rota por la de repuesto, se desmontó la vaina de protección del tornillo de elevación (Figura 3.5) para poder realizar un cambio total de aceite del sistema de lubricación (Figura 3.6). Finalmente se realizaron pruebas de movimiento en elevación que resultaron ampliamente satisfactorias.

Paralelamente a estos trabajos de mantenimiento correctivo en el sistema de lubricación en elevación, se realizó también limpieza de la estructura de soporte de la antena (Figura 3.7). Estos trabajos se asemejan a los realizados en la antena de Ghana, como se describió en el Capítulo 1.

En mayo de 2019 un ex-empleado de Marconi Space Communications Division, el Ing. Rod Hine de Reino Unido, visitó la ETM y durante cinco días trabajó junto a un equipo local, entre

Capítulo 3. Infraestructura de la ETM



Figura 3.1: Antena 2A de 32m de diámetro.



Figura 3.2: Subreflector roto de la antena 2A.



Figura 3.3: Sistema *wheel-and-track* para el movimiento en acimut.



Figura 3.4: Componentes de repuesto disponibles para el sistema de lubricación del tornillo de elevación: bomba de lubricación (izq.) y filtros (der.).

ellos el autor, en analizar las principales tareas a abordar en la reconversión de la antena. En los apartados que siguen se describe la información técnica que se recabó antes y durante dicho trabajo.

3.1.2. Sistema de movimiento y tracking

El sistema de movimiento en cada eje consta de dos subsistemas, uno para movimiento rápido (*slew*) y otro para seguimiento. Ambos subsistemas constan de dos motores cada uno, en configuración anti back-lash, que evitan vibraciones y "sacudidas" al cambiar de sentido de rotación. También cuentan con un motor para accionamiento auxiliar en cada eje. Las características técnicas de estos se sintetizan en la Tabla 3.1.

A su vez, en el manual técnico del fabricante (Sirti) se indica que el error de apuntamiento con viento de 48 km/h y ráfagas de 72 km/h es de 0.032°RMS , es decir, $1.92'$ (=30 % del HPBW a 6 GHz). Para vientos de 72 km/h y ráfagas de 96 km/h el error de apuntamiento es de 0.048°RMS , es decir, $2.88'$ (=45 % del HPBW a 6 GHz). El accionamiento para resguardo, que es un mecanismo de protección ante vientos fuertes que automáticamente lleva la antena a posición de copa (*stow*), ocurre para vientos superiores a 128 km/h ([Sirti, 1984]).

Capítulo 3. Infraestructura de la ETM



Figura 3.5: Desmontaje de vaina de protección del tornillo de elevación, para realizar el cambio de aceite.



Figura 3.6: Trabajos de cambio de aceite de lubricación, realizados en 2019.

Característica	Valor
Resolución del servo	$\pm 0.005^\circ$
Velocidad de giro rápido en AZ	$0.3^\circ/\text{s}$
Aceleración de giro rápido en AZ	$0.3^\circ/\text{s}^2$
Velocidad de giro rápido en EL	$0.12^\circ/\text{s}$
Aceleración de giro rápido en EL	$0.12^\circ/\text{s}^2$
Velocidad de seguimiento en AZ/EL	$0.015^\circ/\text{s}$ max.
Aceleración de seguimiento en AZ/EL	$0.015^\circ/\text{s}^2$ max.

Tabla 3.1: Características técnicas del sistema de movimiento y tracking (Fuente: [Sirti, 1984]).

3.1. Antena 2A

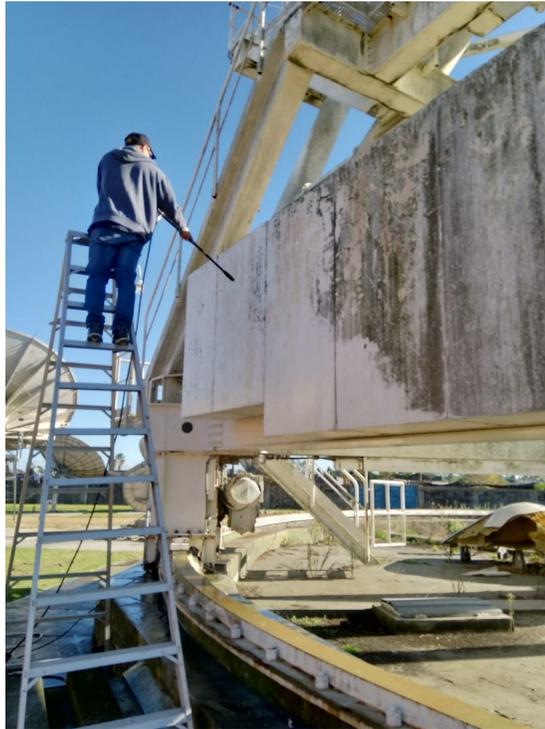


Figura 3.7: Trabajos de limpieza de estructura que se realizaron en paralelo al mantenimiento correctivo del tornillo de elevación.

Los motores de accionamiento en acimut son dos de CC y 2 kW para seguimiento, y dobles motores de CA de 5.5 kW para el movimiento rápido. El motor de accionamiento auxiliar es de CA y 0.37 kW.

Los motores de accionamiento en elevación son dos de CC y 4 kW para seguimiento, y dobles motores de CA y 37 kW para el movimiento rápido. El motor de accionamiento auxiliar es de CA y 5.5 kW.

Cada motor de accionamiento auxiliar está instalado en serie con el motor de giro rápido respectivo, a través de un reductor mecánico y un embrague eléctrico, y permite el apuntamiento manual de la antena a través de unos controles UP-DOWN (arriba-abajo) y CW-CCW, para girar en sentido horario o anti-horario, respectivamente ([Sirti, 1984]).

En el proyecto de reconversión elaborado en 2019, se plantea sustituir los motores de accionamiento auxiliar por servomotores nuevos de potencia, que sirvan para seguimiento, e incluir variadores de velocidad para los motores de movimiento rápido.

La cobertura acimutal actual de la 2A es de -35° a $+140^{\circ}$ NESO. Las limitaciones en acimut están impuestas por la longitud del riel del *wheel-and-track* que no abarca toda la circunferencia. Su diámetro es de 21.9m (72 ft). Extenderlo implica primeramente un estudio de las fundaciones de la antena para verificar que las mismas soportarían su peso (unas 280 ton). En elevación el rango es completo, de $0-90^{\circ}$.

3.1.3. Óptica

El reflector principal está hecho de aluminio ligero, montado sobre una estructura de acero "del tipo costillas radiales, sostenida por una viga circular enrejada de 10.80m". La superficie

Capítulo 3. Infraestructura de la ETM

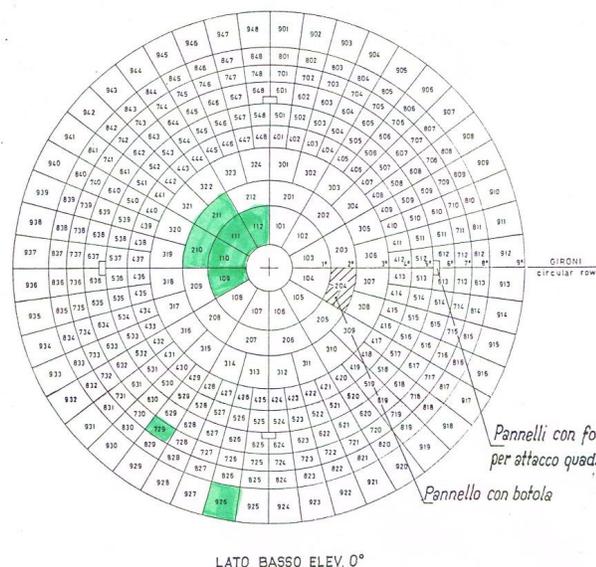


Figura 3.8: Reflector principal de antena 2A. En verde se indican los paneles dañados (Fuente: [Sirti, 1984]).

del reflector fue tratada con pintura especial reflectiva solar.

La distancia focal es de 10.97m (32 ft), y por tanto la razón focal F/D es 0.343. El reflector consta de 336 paneles, mostrados en la Figura 3.8, en la que también se indican en verde 8 de los 9 paneles dañados. Se puede hacer una primera estimación de las pérdidas de ganancia que ocasionan estos paneles faltantes, simplemente considerando el cociente $327/336$, asumiendo que todos los paneles contribuyen de igual manera a la ganancia total de la antena, lo cual es una sobresimplificación. Esto se traduce en -0.12 dB. Si fueran reparados estos paneles, y asumiendo que no toda la ganancia perdida es recuperada debido a que su perfil no será exactamente igual a los dañados, y solo el 50% es recuperado, la pérdida de ganancia resultante en ese caso sería de 0.06 dB, lo cual en sí no resulta significativo. De todas formas, realizar este trabajo de mantenimiento correctivo resulta relevante para evitar que a través de esas aberturas ingrese ruido térmico del suelo al subreflector, lo cual sí tendría un impacto serio en la SNR o G/T ([Hine, 2019]).

El subreflector original está compuesto por una cáscara de fibra de vidrio sobre un núcleo de poliuretano con malla embebida y pintura conductiva bajo pintura blanca (Figura 3.2). La montura triangular del subreflector permanece fija a la estructura de soporte cuadrípode.

Puesto que una parte considerable de la superficie del subreflector está en buenas condiciones, es posible reconstruir su perfil. Para ello, se sugiere en [Hine, 2019] construir un nuevo molde de fibra de vidrio, cuidando la terminación y su ajuste al perfil necesario, por ejemplo mediante fotogrametría. Los ajustes necesarios pueden realizarse agregando costillas de refuerzo y puntos de fijación. Una vez reconstruida la superficie con un error de RMS del orden de 1mm o menos, se pinta con pintura de plata conductiva.

Para la correcta instalación de la nueva pieza en el triángulo de montaje existente se debe utilizar la documentación técnica disponible. Finalmente, en [Hine, 2019] se sugiere incluir pequeños agujeros de drenaje para evitar que el subreflector pueda llenarse de agua.

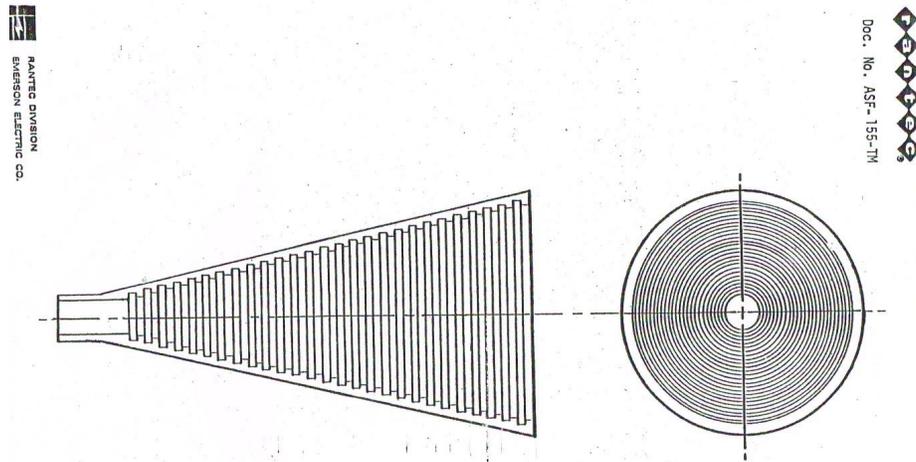


Figure 3-4. Corrugated-Horn

Figura 3.9: Croquis de bocina de alimentación de antena 2A (Fuente: [Sirti, 1984]).

3.1.4. Bocina de alimentación

La bocina de alimentación es circular corrugada, y un croquis se muestra en la Figura 3.9). La documentación disponible permite estimar el límite inferior del rango de operación en unos 3.3 GHz ([Hine, 2019]).

3.2. Antena 3A

Una vista general de la antena se muestra en la Figura 3.10. Comparado a la documentación técnica disponible de la 2A, la 3A posee significativamente menos documentación, por lo menos en una búsqueda en las oficinas donde está la documentación de todas las antenas. De lo que se dispone información es del receptor (*front- y back-end*) y de la unidad de control de antena (ACU).

En líneas generales, el estado de esta antena es significativamente mejor que el de la 2A, y ello es debido a que estuvo operativa hasta fines de 2022 inclusive. En particular, la óptica del sistema está en perfectas condiciones,

3.2.1. Movimiento y tracking

El sistema de movimiento en ambos ejes consiste en motores de inducción trifásicos tanto para movimiento rápido como lento, y controlados por inversores de frecuencia variable de estado sólido.

Actualmente, esta antena tiene movilidad en acimut (rango 33.94°W - 45°E), pero el tornillo de elevación tiene un desperfecto mecánico que imposibilita el movimiento en este eje, estando fijo en 43.60° .

De acuerdo a la documentación técnica del fabricante, las especificaciones de la unidad de control de antena (ACU) son las que se muestran en la Tabla 3.2.

Capítulo 3. Infraestructura de la ETM



Figura 3.10: Vista general de la antena 3A de 16.4m de diámetro.

Característica	Valor
Precisión de seguimiento	10 % de HPBW de recepción, RMS, en modo "Steptrack"
	5 % de HPBW de recepción, RMS, en modo "OPT"
Precisión de encoders de posición	0.02°RMS
Resolución del display de posición	0.01°RMS

Tabla 3.2: Datos de precisión del ACU (Fuente: Manual del fabricante).

El HPBW en recepción (4 GHz) es de $\sim 19'$, por lo que la precisión indicada es nominalmente menor a $1.9'$. En términos de pérdidas por apuntamiento, un 10 % del HPBW corresponde a una pérdida de unos 0.28 dB. Sin embargo, es de esperar que el error de apuntamiento actual sea mayor, por el deterioro producido por el tiempo y la falta de uso.

El diagrama de bloques del ACU tal como está en el Manual de Usuario de la antena, se reproduce en el Apéndice B. Una imagen del panel de control del ACU se muestra en la Figura 3.11, ubicado en la sala de control principal de la ETM.

Una característica interesante es que el ACU de esta antena tiene un modo de *star tracking*, para cálculos de ganancia de antena utilizando el llamado método de radio "estrellas" (*radio star method*), que son en realidad fuentes de radio tipo "A": Cassiopeia A, Cygnus A y Taurus A, entre otras, para el Hemisferio Norte, y Orion, Virgo y Omega para el Hemisferio Sur ([ITU, 2000]).

Los motores de movimiento en acimut y elevación se muestran en las Figuras 3.12 y 3.14, respectivamente, y los tornillos de movimiento en cada dirección en las Figuras 3.13 y 3.15.

3.2. Antena 3A



Figura 3.11: Panel de control de la unidad de control de antena (ACU).



Figura 3.12: Motor de movimiento en acimut.

Capítulo 3. Infraestructura de la ETM



Figura 3.13: Tornillo de movimiento en acimut.



Figura 3.14: Motor de movimiento en elevación.



Figura 3.15: Tornillo de movimiento en elevación.

3.2.2. Receptor

El receptor está basado en un sistema redundante de LNA/LNB 1:2, es decir que cuenta con tres LNA, uno para cada polarización y un tercero de backup (Figura 3.16). Los LNA utilizados en cada polarización son marca MAXTECH modelo LCB-4033, cuyo rango de operación es 3.625-4.2 GHz. La Figura 3.17 muestra la curva de temperatura de ruido dentro del rango de operación del LNA. La ganancia nominal es de 64 dB, siendo la mínima de acuerdo a la hoja de datos 60 dB. Las variaciones de ganancia dentro de la banda de operación son de ± 0.5 dB. La estabilidad de ganancia en el corto plazo (10 min) es de ± 0.1 dB, mediano plazo (24 hs) ± 0.2 dB y largo plazo (1 semana) ± 0.5 dB.

3.3. Antena 106

Una vista general de esta antena se muestra en la Figura 3.18. Se trata de una de dos antenas de 4.2m de diámetro, usadas como backup de una antena Vertex de 6.3m que actualmente brinda conectividad a la Base Científica Antártica Artigas (BCAA).

La antena se puso enteramente a disposición de las actividades realizadas en el marco de la presente tesis, dado que actualmente una única antena de backup resulta suficiente.

La antena tiene un rango de movimiento en acimut de entre -50 y $+60.2^\circ$ y en elevación entre 14 y 65° . Posee recepción en banda C y en banda Ku. El *front-end* del receptor y feeder se muestran en la Figura 3.19.

Las características técnicas del LNB en banda C se muestran en la Tabla 3.3, y las del LNB en banda Ku en la Tabla 3.4. La Tabla 3.5 sintetiza los principales parámetros de la antena, contenidos en la hoja de datos.

De los datos en banda C surge el coeficiente "k" de la Ec. 2.86, $k = 1,17rad$. Utilizando la Ec. 2.88 podemos obtener el área efectiva en ambas bandas:

$$A_{eff,C} = \frac{4ln(2)\lambda^2}{\pi \cdot \theta_{FWHM,C}^2} = 11,3m^2 \quad (3.1)$$

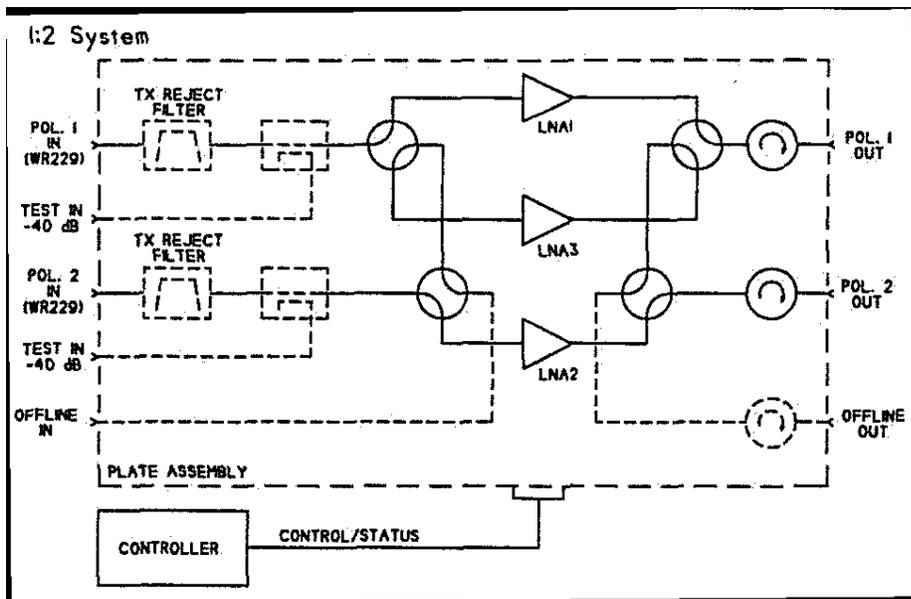


Figura 3.16: Diagrama de bloques del sistema de recepción redundante 1:2 (Fuente de imagen: [Applied Telecommunications, 1997]).

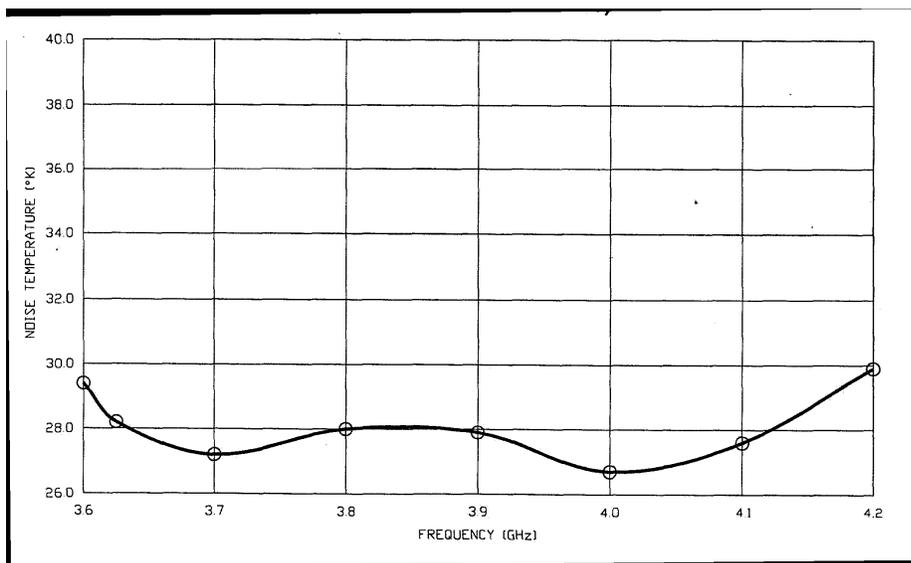


Figura 3.17: Curva de temperatura de ruido dentro del rango de operación del LNA MAXTECH LCB-4033 (Fuente de imagen: [Applied Telecommunications, 1997]).



Figura 3.18: Antena de 4.5m y foco primario, con recepción en banda C y Ku.

Característica	Descripción
Banda RF	3.40-4.20 GHz
Frecuencia Oscilador Local	5.15 GHz
Banda IF	950-1750 MHz
Ganancia	62 dB typ., 55 dB min., 70 dB max.
Variación ganancia	≤6dB p-p max.
Temp. ruido (a temp. ambiente)	20K typ., 24K Max.

Tabla 3.3: Principales características técnicas del LNB en banda C.

Característica	Descripción
Banda RF	10.95-12.15 GHz
Frecuencia Oscilador Local	10.00 GHz
Banda IF	950-2150 MHz
Ganancia	52-65 dB
Variación ganancia	≤5dB p-p typ.
NF	0.7 dB

Tabla 3.4: Principales características técnicas del LNB en banda Ku.



Figura 3.19: Feeder de antena de 4.2m, localizado en el foco del reflector.

Característica	Descripción
Secciones de antena	8
Ratio f/d	0.34
Primer lóbulo lateral (banda C)	2.1°
HPBW (Banda C)	1.2°
Ganancia banda C	43.5
Ganancia banda Ku	53.0

Tabla 3.5: Principales características de la antena de 4.2m.

$$A_{eff,Ku} = \frac{4 \ln(2) \lambda^2}{\pi \cdot \theta_{FWHM,Ku}^2} = 12,2m^2 \quad (3.2)$$

De aquí a su vez pueden determinarse las (máximas) eficiencias de apertura en cada banda, η_{ap} , que surgen de asumir eficiencias óhmicas, de transmisión y de polarización iguales a 1:

$$\eta_{ap,C} = \frac{D_0}{D_{max}} \simeq \frac{A_{eff,C}}{\pi(D/2)^2} \simeq 82 \% \quad (3.3)$$

$$\eta_{ap,Ku} = \frac{D_0}{D_{max}} \simeq \frac{A_{eff,Ku}}{\pi(D/2)^2} \simeq 88 \% \quad (3.4)$$

3.4. Conclusiones

Se presentó en este capítulo los principales datos de la documentación técnica que se ha podido recabar de las tres antenas disponibles para su uso con fines científicos en la ETM. Asimismo, se identificó en cada una, particularmente las de mayor porte, las principales tareas de mantenimiento correctivo necesarias para emprender la reconversión de estas antenas en radiotelescopios.

La antena 2A cuenta ya con un proyecto ejecutivo para su reconversión, que como se indicó en el Capítulo 1 se incluye en el Anexo C.

En el caso de la 3A, las principales tareas serían: reparación de la mecánica del tornillo de elevación, sistema de control para apuntamiento y tracking, y receptor nuevo, sea centrado en 6.7GHz, sea de 4-8 GHz. Estas tres acciones implican a priori una inversión ciertamente modesta para el resultado que brindaría: disponer de un instrumento científico de gran porte y relevancia para el desarrollo de nuevas áreas de investigación científico-tecnológicas en el país.

Dado el estado de la antena 106, su versatilidad por disponer de dos receptores y sobre todo libertad de movimiento en ambos ejes, se decidió realizar el conjunto de mediciones reportados en el Capítulo 5 con esta antena. Sirvió como excelente banco de pruebas de la metodología de adquisición de datos para la obtención de un modelo de apuntamiento, y estimaciones de sensibilidad que permiten a su vez evaluar su uso para detección de la transición de metanol en 12 GHz.

La Tabla 3.6 indica los radiotelescopios que podrían estar disponibles en la ETM a partir de la reconversión de estas antenas. Con respecto a los montos asociados a cada reconversión que se indican en esta tabla, corresponde hacer algunas puntualizaciones. En lo que respecta a la 2A, si bien el monto indicado es el correspondiente a la Fase 1 del proyecto ejecutivo (ver Anexo C) que fue elaborado hace ya algunos años, los ajustes por inflación, etc., que correspondería realizar se ven en parte compensados por el hecho de que los costos estimados en dicho proyecto fueron algo sobreestimados.

Por lo tanto no es de esperar que la inversión necesaria para la reconversión de esta antena sea muy distinta de la indicada. El monto asociado a la 3A se basa en cotizaciones recientes de un receptor de doble polarización de 4-8 GHz, y en estimaciones conservadoras del costo de la pieza mecánica necesaria para la reparación del tornillo de elevación, y su instalación. Finalmente, el monto indicado para la 106 comprende un LNB para banda Ku de un modelo distinto al actual pero de la misma marca¹, que posibilitaría detectar la línea de máser de metanol a 12.2 GHz. Asimismo, incluiría un controlador que posibilita la operación remota de la antena², así como la programación del control de su movimiento.

Antena	Diámetro [m]	Frecuencia [GHz]	Rango acimutal NESO	Monto estimado [US\$]
2A	32	4-8	[-35°, +140°]	250.000
3A	16.4	4-8	[-33.9°, +45°]	60.000
106	4.2	3.4-4.2/11.7-12.75	[-50°, +60.2°]	3.000

Tabla 3.6: Radiotelescopios que podrían estar disponibles en la ETM mediante la reconversión de las antenas 2A, 3A y 106.

En suma, las dos antenas de mayor porte serían principalmente instrumentos de uso científico centrados en una primera etapa en el monitoreo de máseres de metanol en regiones de formación estelar, mientras que la de menor porte tendría principalmente un uso formativo de capacidades locales necesarias para el desarrollo de la radioastronomía en el país. No obstante, es posible que

¹Se trata de un LNB marca Invacom modelo SPV-60SM.

²Se trata del RCI Web Server del fabricante del ACU Research Concepts, Inc.

Capítulo 3. Infraestructura de la ETM

incluso la antena 106 pueda ser utilizada para el monitoreo de destellos brillantes de máseres de metanol en 12.2 GHz.

El relevamiento de documentación técnica y posterior análisis de principales desafíos técnicos descritos en este capítulo, sumado a la experiencia adquirida con la operación de la 106, serán fundamentales para la elaboración de un Proyecto Ejecutivo detallado para la reconversión de la antena 3A, y quizá en un futuro no demasiado lejano, para una ejecución exitosa del proyecto de reconversión de la 2A.

Capítulo 4

RFI

La interferencia en radiofrecuencias (RFI, por su sigla en inglés) desde el punto de vista de la radioastronomía abarca una pléyade de fuentes de disinto origen y características: radiobases para telecomunicaciones móviles, radares de navegación aérea y marítima, transponders satelitales, estaciones de radiodifusión, entre muchas otras. Incluso parques eólicos y granjas fotovoltaicas pueden generar RFI, en el primer caso por dispersión de ondas radioeléctricas en las aspas de los aerogeneradores, en el segundo caso por la electrónica de los inversores.

En este capítulo se brinda un panorama general de las fuentes y servicios que suponen problemas más comúnmente, las acciones de mitigación que pueden emplearse, y se fundamenta la importancia del monitoreo de interferencias en radiofrecuencias en observatorios radioastronómicos. Asimismo, se presenta un sistema para el monitoreo de RFI y mediciones de RFI a modo de ejemplo, realizadas en Morelia, Michoacán (México), así como datos de interferencias de telecomunicaciones móviles de 5a generación (5G, o IMT2020) detectados en la Estación Terrena de Manga, su caracterización e impacto en mediciones de continuo de radio.

Cabe destacar que una de las peculiaridades de proyectos de reconversión en lo que refiere a RFI, es que no se dispone de una de las acciones de mitigación más frecuentes en radioobservatorios, que es su ubicación lejos ($> 100km$) de centros urbanos. Las estaciones terrenas usualmente se encuentran a pocos km de pueblos o ciudades, por lo que el ambiente de RFI es dado.

4.1. Introducción

La tendencia general en lo que refiere a uso del espectro radioeléctrico, es a una necesidad creciente por parte de la industria, particularmente de las telecomunicaciones móviles avanzadas o IMT, de más espectro necesario para satisfacer la creciente demanda de ancho de banda, motivada tanto por el aumento del número de dispositivos interconectados (particularmente IoT), como por los servicios que requieren cada vez mayor capacidad de transferencia de datos y menores latencias.

En lo que refiere a radiodifusión, el uso más eficiente del espectro que supone el broadcasting digital (tanto de audio como video) puede verse -en principio- contrarrestado con el despliegue de mayor número de estaciones ([Bentum et al., 2010]). A nivel terrestre, estos servicios constituyen las principales amenazas y la tendencia indicada no parece tener un freno: es algo con lo que se debe convivir.

Paralelamente, el *boom* de las constelaciones satelitales en órbita baja desplegadas principalmente para servicios de internet satelital, constituyen una novedosa amenaza para las necesidades de radiootelescopios cada vez más sensibles. Sus enlaces de subida y bajada son en banda Ka y Ku, y a diferencia de los clásicos satélites de telecomunicaciones ubicados en órbitas geoesta-

Capítulo 4. RFI

cionarias, localizados en el espacio (en el plano ecuatorial) y de nivel de señal estable, estas constelaciones generan RFI proveniente de distintas partes del cielo, aunque por supuesto no constituyen fuentes constantes en el tiempo.

La creciente necesidad de espectro por parte de la industria ha impulsado un desarrollo tecnológico aún en ciernes como lo es el acceso o gestión dinámica del espectro (DSA o DSM, por sus respectivas siglas en inglés), que supone la utilización por parte de licenciarios secundarios de porciones de espectro atribuidas en carácter primario a un tercero, en determinadas franjas horarias en que ello es posible ([Liang, 2020]). Se espera que en la medida en que estas tecnologías emergentes se vuelvan la norma, sustituyendo la gestión tradicional basada en atribuciones fijas en tiempo y frecuencia, el ambiente de RFI desde el punto de vista radioastronómico cambiará radicalmente, lo cual va a requerir cambiar o replantear las estrategias de mitigación que se han venido manejando hasta ahora. En particular, esta variabilidad en el tiempo del ambiente de RFI supondrá un desafío sobre todo para el estudio de eventos transitorios como FRB, pulsares, etc ([An et al., 2017]).

Tanto para señales satelitales como para radares aeronáuticos, no es posible adoptar muchas de las acciones de mitigación y/o de prevención que sí valen para fuentes terrestres. A su vez, las fuentes de RFI espaciales tienen mayor variabilidad temporal y espacial, sumado a que existen satélites militares sobre los que directamente se desconocen sus frecuencias de operación, órbitas, etc. El carácter dinámico del ecosistema satelital actual es un factor adicional importante que justifica el monitoreo permanente del ambiente de RFI en un radioobservatorio.

Ya se mencionó la generación de RFI debida a parques eólicos, a través del efecto de dispersión de ondas radioeléctricas en las palas de las turbinas, lo cual genera RFI que además es variable en el tiempo. En [Bentum et al., 2010] se reportan variaciones de hasta +4dB debido a este efecto por dispersión de señales de FM.

Independientemente del origen de la señal de RFI, si se trata de señales fuertes, el principal problema que ocasionan, aun si están por fuera de la banda de interés, es que pueden ocasionar que la electrónica del sistema de recepción opere fuera del régimen de linealidad, ocasionando a su vez distorsión por intermodulación. Esto implica la generación de señales espurias, algunas de las cuales resultan difíciles de filtrar por su proximidad a las frecuencias de interés. Un ejemplo de ocurrencia de esto lo ocasionan señales de FM en las bandas de LOFAR (30-80 MHz y 120-240 MHz).

Paradójicamente, ocurre que una importante porción de la RFI que afecta las observaciones radioastronómicas es ocasionada por el propio radioobservatorio: módems, electrónica de alta velocidad presente en los *back-ends* digitales de receptores, etc. Ello hace que las salas de control de muchos observatorios cuenten con aislación de RFI, como ocurre en Green Bank y Parkes. A su vez, este es un factor adicional que motiva la necesidad del monitoreo permanente del ambiente de RFI en un radioobservatorio, en el que es frecuente la instalación de nuevo equipamiento, o el reemplazo de equipamiento existente ([Kesteven, 2007]).

Las firmas espectrales de las distintas fuentes de RFI son diversas: las hay que abarcan un rango relativamente amplio de frecuencias (*broadband*), o que solo afectan algunos canales (*narrow band*); como ya se señaló, pueden ser transitorias o estables en el tiempo, y si bien en general son mucho más potentes que las señales radioastronómicas, pueden llegar a tener niveles comparables y ser confundidas incluso con fuentes astronómicas transitorias ([An et al., 2017]).

Finalmente cabe agregar que un array ofrece cierta protección contra RFI que un instrumento basado en un solo radiotelescopio no, y ello se debe al propio principio de funcionamiento de un interferómetro: mientras que las señales que arriban de una fuente astronómica a las distintas antenas que conforman el array son ajustadas en fase y retardo en el correlador, maximizando la SNR, una señal RFI no es coherente en su arribo a las distintas antenas y por lo tanto estarán desfasadas en su arribo al correlador, provocando que la suma resultante se vea atenuada ([Kesteven, 2007]).

4.2. Acciones de mitigación

Las medidas que pueden adoptarse para mitigar los efectos de RFI son diversas. En [Kesteven, 2007] se agrupan en tres categorías:

- de prevención;
- regulatorias;
- de remoción;

Las dos primeras pueden ser consideradas acciones *proactivas*, y son las que tienen un mayor efecto en la disminución de la RFI. Las terceras son acciones *reactivas*, es decir, que se adoptan frente a un ambiente de RFI dado y buscan mitigar sus efectos.

En [An et al., 2017] se agrupan en cuatro conjuntos, una categorización pensada más bien para interferómetros:

- de prevención:
- de pre-detección: aplicadas al sistema de recepción de datos, usualmente en el *back-end* del receptor;
- de pre-correlación: adoptadas a las señales antes de su arribo al correlador;
- de post-correlación: adoptadas a la señal de salida del correlador, en tiempo real o a buffers de datos;

Por su adecuación a nuestro contexto, en los apartados siguientes se utiliza la clasificación de [Kesteven, 2007].

4.2.1. Prevención

La prevención de los efectos adversos de la contaminación por RFI aplica sobre todo a proyectos de nuevos instrumentos e instalaciones, en los cuales se tiene en cuenta la RFI desde las primeras etapas de diseño, tanto para la elección del sitio de instalación como en la definición de las posibilidades científicas que se puede esperar del experimento propuesto en función de la presencia o no de RFI dentro de la banda o en regiones adyacentes del espectro. La elección de sitios remotos o resguardados naturalmente por encontrarse en valles rodeados de elevaciones, como es el caso por ejemplo del *Green Bank Observatory* en West Virginia (EEUU), ha sido históricamente el caso y lo sigue siendo aun hoy en experimentos como los ya citados LOFAR, BINGO, y por supuesto SKA.

En [Bentum et al., 2010] se recomiendan algunas distancias mínimas a diversa infraestructura, que es necesario tener en cuenta a la hora de escoger un sitio para la instalación de un radioobservatorio:

- Líneas de alta tensión: 2 km.
- Autopistas: 500 m.
- Urbanizaciones: 500 m.
- Líneas férreas: 2 km.
- Parques eólicos: 2 km.
- Bosques o árboles altos: 100 m.

Por supuesto que siempre hay un compromiso en estos casos entre que el sitio sea lo más remoto posible, sin dificultar en demasía la logística de la construcción del sitio, primero, y su operación, después. Por otro lado, la topografía y/o la distancia a infraestructura terrestre no ofrece ninguna protección contra la RFI proveniente de transmisiones satelitales.

Dentro de esta categoría de acciones se incluye también algo que podría llamarse "uso compartido" de espectro, y que aplica para aquellas señales de RFI que tienen una variabilidad importante en el tiempo, frecuentemente entre el día y la noche. Ello ocurre muy notablemente

Capítulo 4. RFI

en señales de RFI proveniente de radiobases y terminales móviles, como muestran los resultados descritos en la Sección 4.3.1. Si los niveles de RFI son lo suficientemente bajos, es posible realizar la obtención de datos científicos durante esos tramos horarios.

4.2.2. Acciones regulatorias

Las acciones regulatorias comprenden la protección tanto de bandas espectrales como de sitios y/o regiones circundantes a un observatorio.

Un ejemplo de esto último, de nuevo, es el *Green Bank Observatory* (con cuyo telescopio GBT se obtuvieron los datos analizados en el Capítulo 7) que está dentro de lo que ya en 1958 se declaró como *National Radio Quiet Zone* (NRQZ) ([Kesteven, 2007]), un área de unos 33.600 km² ($\sim 2^\circ \times 2^\circ$, a $\phi \sim 38^\circ \text{N}$), es decir, unas dos veces el área del departamento de Tacuarembó. La ubicación de cualquier transmisor nuevo, o modificación a uno existente dentro de esta zona debe ser primeramente coordinado con la oficina de la NRQZ previo a la tramitación ante la autoridad reguladora de telecomunicaciones (FCC).

Otro ejemplo lo constituye el radiotelescopio FAST en China, el mayor reflector del mundo (500m), que también está localizado en una RQZ. Aquí, cualquier equipo generador de microondas está prohibido dentro de los 5km circundantes al telescopio, la instalación de radiobases con potencias efectivas iguales o superiores a 100W que operen entre 68-3000 MHz no está permitida entre los 5 y 10 km, y hasta los 30 km debe coordinarse cualquier instalación de estaciones transmisoras ([An et al., 2017]).

La protección de bandas espectrales para radioastronomía pueden impulsarse a nivel nacional a través de la autoridad regulatoria que en Uruguay es la URSEC, o a través de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, por su sigla en inglés), particularmente en las Conferencias Mundiales de Radio que tienen lugar cada 4 años, donde se discuten y resuelven modificaciones al Reglamento de Radio (RR). Este documento constituye la principal guía para las administraciones en lo que refiere a gestión del espectro radioeléctrico, y contiene las atribuciones para cada una de las regiones (1, 2 y 3) en que se divide el globo a estos efectos. Uruguay pertenece a la Región 2, al igual que el resto del continente americano.

Una atribución en carácter primario de una determinada porción de espectro reserva para un determinado servicio ("Radioastronomía" es uno de estos servicios) esa porción de espectro. En general las distintas bandas y subbandas en el RR contienen asimismo notas que usualmente valen para una administración (país) en particular y que establecen o bien asignaciones en carácter secundario, o bien otras asignaciones primarias distintas de la genérica. Los llamados "Cuadros Nacionales de Atribución de Frecuencias" (CNAF) tienen alcance nacional y son básicamente el RR con las notas que valen para esa administración en particular.

De todas formas, son magros los resultados que suelen obtenerse en las Conferencias Mundiales de Radio en lo que refiere a protección de bandas para radioastronomía frente a la creciente demanda de la industria y la defensa. Las bandas atribuidas en carácter primario al servicio de radioastronomía son absolutamente insuficientes para llevar a cabo los principales experimentos radioastronómicos actuales o proyectados.

Como ya se señaló en el Capítulo 1, el experimento BINGO se propone estudiar la línea de 21 cm de Hidrógeno (1420 MHz) con corrimientos Doppler que abarcan el rango 980-1260 MHz ($z=0.13-0.48$), y los límites de este rango fueron de hecho impuestos por RFI (banda 900 GSM, servicio móvil aeronáutico, GPS, entre otros). Este ejemplo ilustra en general la situación de observaciones de líneas espectrales, que tienen corrimientos Doppler significativos y requieren por lo tanto rangos amplios de espectro ([Kesteven, 2007]).

4.2.3. Remoción

Este grupo se subdivide a su vez en dos grupos de acciones, denominados en [Kesteven, 2007] de supresión (*blanking*) y de cancelación (*cancelling*). La principal diferencia entre am-

4.2. Acciones de mitigación

5G INTERFERENCE PLL LNB 3200-sBPF



5G BAND PASS FILTER eBPF-C



Figura 4.1: Filtros marca Norsat modelo 3200 BPF, diseñados específicamente para su uso en cabeceras satelitales en banda C, para suprimir la interferencia adyacente proveniente de servicios 5G en la banda 3500.

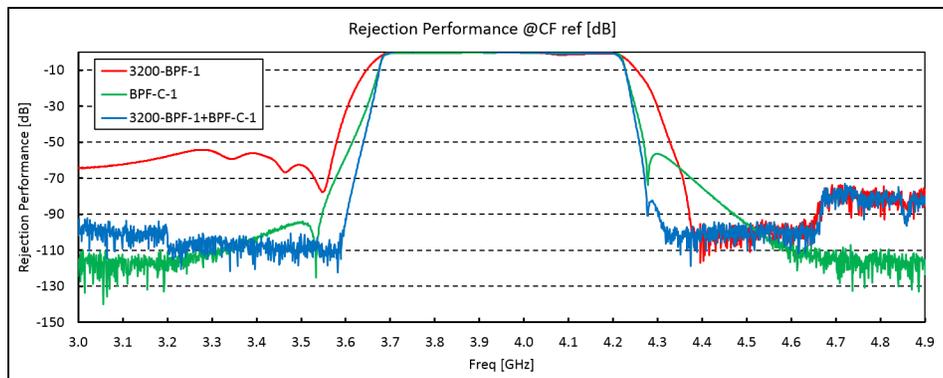


Figura 4.2: Atenuación de los filtros Norsat. Las distintas curvas corresponden a tres posibles configuraciones de hardware, adecuadas según el nivel de interferencias de 5G percibidos en el enlace satelital.

bos es que en el primero se suprime tanto la RFI como los datos de ciencia contaminados por ella, mientras que en el segundo se elimina o al menos reduce a niveles "tolerables" la RFI, conservando los datos de ciencia.

Hablamos de supresión cuando las señales de RFI son tales que inutilizan uno o varios canales en la banda de interés, lo cual usualmente es el caso para por ejemplo señales de radiodifusión. Entonces, la medida más común es la de "flaggear" dichos canales, es decir, no tenerlos para nada en cuenta en la cadena de postprocesamiento de datos. La supresión en el dominio de frecuencias tiene sus limitaciones sobre todo si existen señales de RFI intensas y angostas que puedan causar no-linealidades en el sistema, o si el procesamiento ocasiona *aliasing* ([Kesteven, 2007]).

La cancelación de una señal de RFI puede ser lograda a través de filtros de hardware y/o software (en el dominio temporal o de frecuencia). Un filtro "físico" que suprime señales fuertes de RFI tiene como principales desventajas una pérdida de inserción y consecuente aumento de la temperatura del sistema a las frecuencias cercanas al borde del filtro paso banda. En el caso de observaciones de continuo, el filtrado afecta la potencia recibida, si incluye a una parte de la banda de operación del radiómetro ([An et al., 2017]).

Un ejemplo de filtros se muestran en la Figura 4.1, diseñados para atenuar señales interferentes 5G en la banda de 3500, para su instalación en cabeceras satelitales en banda C. Su desempeño en términos de atenuación de estas señales se muestra en la Figura 4.2.

Capítulo 4. RFI

En el dominio temporal, es posible suprimir temporalmente, es decir, detener la adquisición de una fuente de RFI periódica e impulsiva. El resultado de esta estrategia es simplemente un aumento del tiempo de observación necesario para alcanzar una determinada relación señal a ruido.

En lo que hace a filtros de software, el más utilizado para observaciones de continuo es el filtro de Wiener, para el caso de fuentes de RFI conocidas y asumidas estacionarias ([An et al., 2017], [Kesteven, 2007]).

El filtro de mediana es otra herramienta utilizada, que puede actuar en uno solo de los dominios temporal o de frecuencia, o en ambos. Un algoritmo basado en un filtro de mediana 2D se describe en [Bhat et al., 2005] para series de datos obtenidos con el GBT y con Arecibo. El esquema en lo esencial implica aplicar un filtro de mediana bidimensional en tiempo y frecuencia, y luego fijar umbrales que permitan identificar y flaggear las señales de RFI ([Bhat et al., 2005]).

4.3. Desafíos para proyectos de reconversión

Cuando se trata de un proyecto de construcción de un radioobservatorio "desde 0", durante la etapa de selección del sitio donde se va a ubicar, uno de los factores que se tienen en cuenta es por supuesto el nivel de RFI, en aquellas bandas de interés para el proyecto en cuestión (ver por ejemplo, [Bentum et al., 2010], [Peel et al., 2019]). En proyectos de reconversión de antenas pre-existentes en radiotelescopios el sitio es dado, pues los costos asociados a dismantelar y re-localizar la infraestructura en un sitio más conveniente desde el punto de vista de la RFI, no lo justifican.

Además, usualmente esta infraestructura no suele estar ubicada en sitios remotos, en algunos casos incluso a muy pocos kilómetros de grandes centros urbanos. En suma, en proyectos de reconversión las medidas regulatorias o de prevención descritas anteriormente no resultan viables, y por lo tanto las únicas disponibles son las de remoción.

En líneas generales, la ciencia posible y/o que se busca realizar a través de la reconversión de una antena de telecomunicaciones, estará dictada por la infraestructura e inversión disponibles (con un límite superior de frecuencia típicamente de 15-20 GHz), pero también por el ambiente de RFI. Mediciones del continuo de radio exigen anchos de banda mayores, y eso tendrá asociados sus retos específicos, mientras que si el foco científico está puesto en líneas espectrales (máseres de OH o metanol, HI) es preciso evaluar el espectro en torno a esas frecuencias.

El rango de frecuencias de operación de la mayor parte de los proyectos de reconversión ya realizados o en marcha que fueron presentados en el "Dish Conversion Workshop" en Ghana en 2019¹, están centrados en 6.7 GHz y con anchos de banda de ~300 MHz, es decir, en una región del espectro poco contaminada por RFI. De todas formas, algunos proyectos como Tulancingo y Goonhilly comprenden el rango de 4-8 GHz, y entonces es preciso obtener primero un panorama general del ambiente de RFI en este rango, y luego monitorear determinadas porciones de interés dentro de la banda de operación.

Un único relevamiento de baja resolución espectral pero que abarca un amplio rango de frecuencias es útil cuando se pretende tener un pantallazo general de las posibles señales que pueden llevar la electrónica del receptor a regímenes no lineales, aun en el caso de señales fuera de banda ([Bentum et al., 2010]). Para conocer el comportamiento dinámico del espectro en la banda de interés, evidentemente es preciso monitorearlo con una estación de monitoreo. En los subapartados siguientes se describe primero una estación de monitoreo basada en un espectrómetro configurable, que fue instalado en el campus de UNAM en Morelia, Estado de Michoacán, y que será instalado en la Estación Terrena de Tulancingo. En el subapartado siguiente se muestra en qué medida señales permanentes de RFI presentes dentro de la banda de un receptor en banda C afectan mediciones de continuo, y cómo este ruido se puede modelar.

¹ Ver <https://dragn.info/dish-conversion/>.

4.3. Desafíos para proyectos de reconversión



Figura 4.3: Receptor CRFS RFeye node 100-18 (Fuente de imagen: manual del fabricante).

4.3.1. Monitoreo de RFI - Morelia

En esta sección se describe los principales componentes (hardware y software) de una estación de monitoreo de RFI que será utilizada para el proyecto de reconversión de Tulancingo, así como resultados obtenidos en el campus de la UNAM-Morelia (Michoacán) a modo de ejemplo.

Hardware

Los componentes mínimos de una estación de monitoreo de RFI son un espectrómetro y una antena, y ocasionalmente y dependiendo del contexto y del tipo de señal que se quiera analizar, se puede añadir un amplificador a la entrada del espectrómetro. Esto último es conveniente cuando se quiere analizar señales de RFI más débiles, usualmente cuando están dentro de la banda de interés (en inglés, *in-band RFI*). Si el foco es el estudio de señales más intensas, como pueden ser estaciones de radiodifusión, radiobases, etc, cercanas a la ubicación del radiotelescopio, es posible y aun deseable prescindir de una etapa de amplificación a la entrada del analizador de espectro o espectrómetro (ver por ejemplo la campaña de mediciones realizada para LOFAR, descrita en [Bentum et al., 2010]).

En mediciones de campo suele utilizarse como espectrómetro un analizador de espectro, cuyas ventajas son su portabilidad y funciones programables a través de una pantalla. Los analizadores de espectro suelen incorporar también puertos de salida para conectividad y también almacenamiento externo.

Para las mediciones llevadas a cabo en el marco de la presente tesis, se utilizó como espectrómetro un receptor de muy amplio rango (9 kHz-18GHz)², que se muestra en la Figura 4.3. Las principales características de este instrumento se muestran en la Tabla 4.1.

Este instrumento posee puertos USB para conexión de unidades de almacenamiento externo, y a través de un puerto LAN es posible acceder a su sistema operativo (Linux), así como a una interfaz web que permite varias funcionalidades, como la configuración de la adquisición que se realiza editando un archivo como el que se muestra en el Anexo A. Asimismo, se conectó al instrumento un receptor GPS.

²Marca CRFS modelo RFeye Node 100-18.

Capítulo 4. RFI

CRFS RFEYE NODE 100-18	
Número de canales:	3
Rango:	9 kHz-18 GHz
Figura de ruido (5.9-10 GHz):	9.5 dB
Ancho de banda:	100 MHz
Resolución muestreo:	16 bits/canal (I/Q)
Consumo el. promedio:	40W

Tabla 4.1: Principales características del receptor CRFS RFeye Node 100-18, obtenidas de su hoja de datos.

Scan Id	Rango [MHz]	Res. temporal [s]	Res. espectral [kHz]
0	[87,999]	10	122
1	[2000,6999]	10	977

Tabla 4.2: Características de las dos configuraciones utilizadas para el monitoreo de RFI.

La adquisición se realiza a través de dos de los tres canales de entrada disponibles. Uno de los escaneos se configuró para cubrir el rango de 88 a 1000 MHz (scan0), cada 1s y una resolución de canal deseada de 400 kHz. El segundo escaneo (scan1) cubre el rango de 2-7 GHz, cada 1s y una resolución de canal deseada de 2000 kHz. En ambos casos, se registra el pico de 10 escaneos, de modo que la resolución temporal que se obtiene es de diez segundos. Asumiendo un piso de ruido de -80dBm, las resoluciones espectrales seteadas permiten a priori detectar una señal de RFI de ancho de banda angosto (digamos, 10 kHz) hasta una potencia de unos $-80 + 10\log(2000/10) \sim -57\text{dBm}$, lo cual resulta suficiente³.

Con respecto a la resolución de canal, es preciso puntualizar que los valores seteados representan valores nominales. Para analizadores de espectro basados en receptores superheterodinos, como es el caso, la resolución espectral (RBW) se vincula con el tiempo de barrido (*sweep time*, τ_{sweep}) de acuerdo a:

$$\tau_{sweep} = k \cdot \frac{\Delta f}{RBW^2} \quad (4.1)$$

donde k es una constante de proporcionalidad y Δf es el rango (*span*) total fijado. Por ejemplo, para $\Delta f=1000-88\text{MHz}=912\text{MHz}$ y $RBW=400\text{kHz}$, τ_{sweep} es del orden de ms, bastante menos que el tiempo entre barrido y barrido fijado (1s).

Sin embargo, entre barrido y barrido también hay un tiempo "muerto" de procesamiento y tráfico I/O de datos hacia la unidad de almacenamiento externo, en nuestro caso. El analizador de espectro utilizado tiene en cuenta entonces el tiempo entre barrido y barrido fijado por el usuario, y fija entonces la menor RBW que es posible alcanzar. En este caso, las resoluciones efectivas son de 122 kHz y 977 kHz para los escaneos 0 y 1, respectivamente.

En el archivo de configuración se especifica que el tamaño máximo de cada archivo de datos generado es de 10 MB, y cada archivo generado tiene un tamaño efectivo de 9.5 MB. Un día de datos de los escaneos 0 y 1 contiene típicamente 7 y 5 archivos, respectivamente. Ello implica que un mes de datos totalizan unos 3.4 GB.

La antena utilizada para el monitoreo hasta 1 GHz, es una antena⁴ de polarización vertical,

³Algunos ejemplos reales de nivel de señales de RFI detectadas en un radioobservatorio pueden encontrarse por ejemplo en el sitio del Observatorio de Parkes: <https://www.parkes.atnf.csiro.au/observing/rfi/> (Disponible en 23/06/2024).

⁴Marca Steatite modelo QOM-SL-0.01-1-N-SG-R.

4.3. Desafíos para proyectos de reconversión



Figura 4.4: Imagen de la antena Steatite QOM-SL-0.01-1-N-SG-R (Fuente: hoja de datos del fabricante).

omnidireccional y rango de operación de 10 MHz-1.0 GHz (ver Figura 4.4). Los patrones de radiación vertical a distintas frecuencias se muestran en la Figura 4.5. La ganancia de la antena (medida con la referencia a una antena de ganancia isotrópica) en función de la frecuencia se muestra en la Figura 4.6, en la que se aprecia que a 29 MHz la ganancia es de -14 dBi, entre 81-700 MHz adopta valores entre -6 y -4 dBi, y entre 700 y 1000 MHz entre -4 y -1 dBi, con un pico a 900 MHz. Corresponde señalar que los valores negativos de ganancia con respecto a una antena isotrópica indican pérdidas, ya que:

$$G = \epsilon \cdot D \quad (4.2)$$

donde D es la directividad, y ϵ la eficiencia.

El patrón de radiación vertical también está contenido en la hoja de datos del fabricante en la forma de un conjunto de gráficos de ganancia versus ángulo cenital, para cinco frecuencias distintas (ver Figura 4.5).

Para el monitoreo entre 2 y 8 GHz, se utilizó también una antena⁵ omnidireccional de amplio rango (2-18 GHz). Una imagen de esta antena y su curva de ganancia dentro de este rango se muestra en la Figura 4.7.

Post-procesamiento

Los archivos generados por el receptor RFeye son de formato binario, totalmente documentado por el fabricante (ver [CRFS, 2018]). Para el procesamiento de estos archivos se escribió un conjunto de rutinas en MATLAB, que se describen sucintamente a continuación.

readBinary: Esta función toma como parámetro de entrada un archivo binario generado por el RFeye, y devuelve las frecuencias de inicio y fin del barrido, y una matriz cuyas filas corresponden al espectro obtenido en cada barrido. El primer elemento de cada fila es la marca de tiempo del reloj interno del instrumento del barrido correspondiente.

⁵Marca ElectroMetrics modelo EM-6865A.

Capítulo 4. RFI

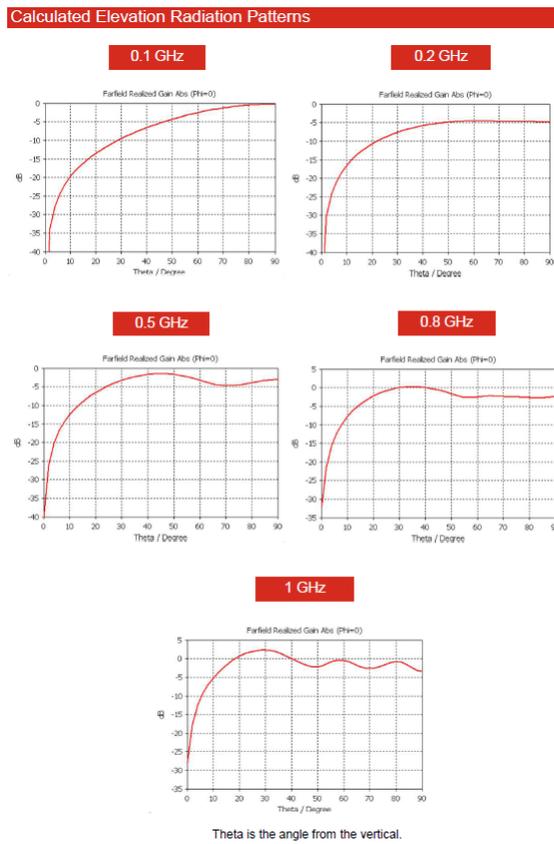


Figura 4.5: Patrones de radiación vertical de la antena Steatite QOM-SL-0.01-1-N-SG-R para distintas frecuencias dentro del rango de operación (Fuente: hoja de datos del fabricante).

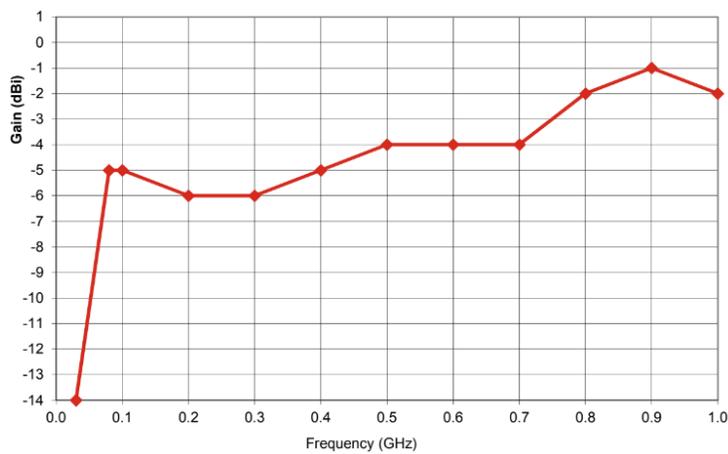


Figura 4.6: Ganancia de la antena Steatite QOM-SL-0.01-1-N-SG-R (Fuente: hoja de datos del fabricante).

4.3. Desafíos para proyectos de reconversión

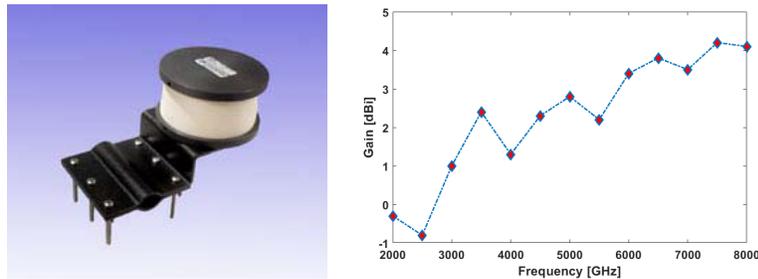


Figura 4.7: Imagen de la antena ElectroMetrics EM-6865A (izq.) y curva de ganancia en función de la frecuencia (Fuente: hoja de datos del fabricante).

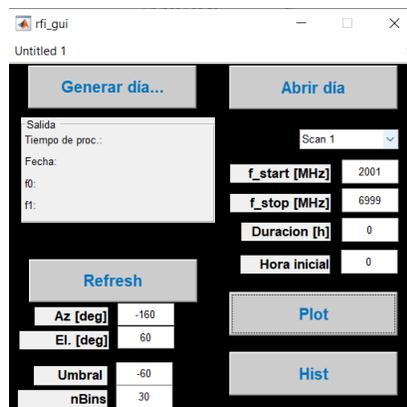


Figura 4.8: Interfaz gráfica de la aplicación desarrollada para el procesamiento de datos de RFI.

readDay: Esta función toma como parámetro de entrada un directorio en donde se encuentran todos los archivos binarios generados un día, lee cada archivo mediante la función *readBinary* y escribe los barridos en un archivo de texto cuyo nombre es la fecha del día en cuestión.

rfi_gui: Finalmente se desarrolló una aplicación con una sencilla interfaz gráfica (Figura 4.8) que permite, primero, generar un único archivo para un día, utilizando la función *readDay*. Luego, abrir ese único archivo y graficar todo o una parte del espectro, durante todo o una parte del día.

Resultados

De acuerdo a los Datos Abiertos del Registro Público de Concesiones⁶ (RPC) del Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT) de Mexico, las estaciones FM en la ciudad de Morelia son las indicadas en la Tabla 4.3, y las estaciones de TV son las mostradas en la Tabla 4.4.

Un primer pantallazo del espectro en los dos escaneos se muestra en las Figuras 4.9 y 4.10.

El espectrograma de un día entero del Scan 0 se muestra en la Figura 4.11. Como puede apreciarse, los servicios de radiodifusión (FM y TV, en VHF y UHF), mantienen un nivel estable en el tiempo, sin variaciones significativas. La Figura 4.12 muestra la identificación de las señales de TV digital detectadas.

Si definimos un indicador de ocupación de canal como el porcentaje del tiempo en que el nivel de señal es superior a un cierto umbral, por ejemplo -60 dBm, en estos casos la ocupación

⁶<https://rpc.ift.org.mx/vrpc/visor/downloads>

Capítulo 4. RFI

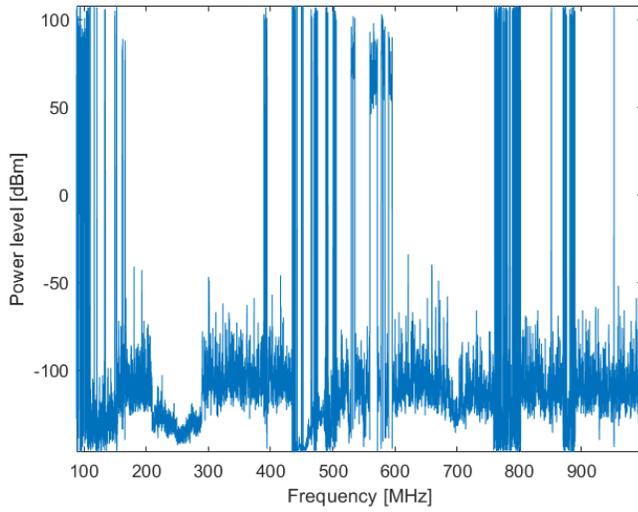


Figura 4.9: Espectro del Scan 0 (87-999 MHz) para un instante de tiempo del 23/01/2023.

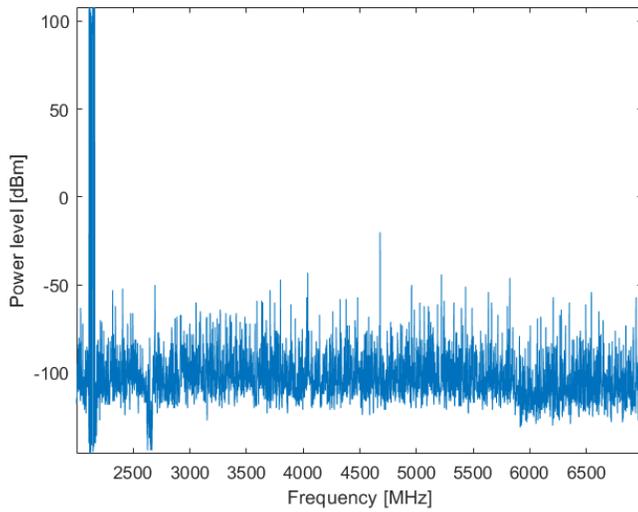


Figura 4.10: Espectro del Scan 1 (2000-6999 MHz) para un instante de tiempo del 23/01/2023.

4.3. Desafíos para proyectos de reconversión

Tipo	Concesionario/Permisionario	Frecuencia [MHz]
COMERCIAL	SUCN. DE JOSÉ LARIS ITURBIDE	105.1
COMERCIAL	CORPORACIÓN MORELIA MULTIMEDIA, S.A. DE C.V.	89.3
COMERCIAL	RADIO TREMOR MORELIA, S.A. DE C.V.	96.3
COMERCIAL	DÍALO CANTANDO, S.A. DE C.V.	102.5
COMERCIAL	JOSÉ HUMBERTO Y LOUCILLE MARTÍNEZ MORALES	91.5
COMERCIAL	LY, S.A.	92.3
COMERCIAL	LARIS HERMANOS, S.A.	90.1
PUBLICO	UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO	104.3
COMERCIAL	RADIO XHMO, S. DE R.L. DE C.V.	93.9
COMERCIAL	CARLOS DE JESUS QUIÑONES ARMENDARIZ	93.1
COMERCIAL	RADIO XHEMM, S. DE R.L. DE C.V.	101.7
PUBLICO	GOBIERNO DEL ESTADO DE MICHOACÁN	106.9
SOCIAL	FLAVIO RENÉ ACEVEDO	99.1
SOCIAL	FUNDACIÓN RADIODIFUSORAS CAPITAL, A.C.	97.3
SOCIAL	LA VOZ DEL VIENTO, A.C.	103.3
SOCIAL	UNIVERSIDAD VASCO DE QUIROGA, A.C.	98.1
PUBLICO	SECRETARÍA DE CULTURA	95.3
SOCIAL	COMUNITARIA RM MORELIA, A.C.	106.1
SOCIAL	COMUNITARIA CIUDADANOS MICHOACANOS EN MOVIMIENTO, A.C.	105.5

Tabla 4.3: Listado de estaciones FM de la ciudad de Morelia (Michoacán, México), de acuerdo a los Datos Abiertos del RPC del IFT.

Concesionario/Permisionario	Rango de frecuencias [MHz]	Señal(es)
TELEVISIÓN DE MICHOACÁN, S.A. DE C.V.	494-500	CANAL 47.1 DE MORELIA, MICH.
RADIO TELEVISIÓN, S.A. DE C.V.	560-566	CANAL 5/ NU9VE
TELEVISIÓN AZTECA III, S.A. DE C.V.	578-584	AZTECA 7/ A+
SISTEMA PÚBLICO DE RD DEL ESTADO MEXICANO	500-506	CANAL CATORCE/ CANAL 22/ TV UNAM/ CANAL ONCE
GOBIERNO DEL ESTADO DE MICHOACÁN	470-476	LOCAL
CADENA TRES I, S.A. DE C.V.	476-482	IMAGEN TV/EXCÉLSIOR TV
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL	210-216	TV 13

Tabla 4.4: Listado de estaciones de TV de la ciudad de Morelia (Michoacán, México), de acuerdo a los Datos Abiertos del RPC del IFT.

es prácticamente del 100 %.

En la Figura 4.13 se observa en los servicios de IMT, tanto en banda de 700 como 800, una porción de tiempo, entre las 8 y 12 UT aproximadamente (2 y 6 AM hora local), un descenso en el nivel de señal. Por ejemplo, para la banda de 700 MHz (760-800) el cálculo del índice de ocupación (considerando -60 dBm de umbral) arroja un valor del 14.5 % entre las 08 y las 12UT, mientras que fuera de este horario es del 37 %. No obstante, ello no significa que sea viable realizar mediciones dentro de esta banda, pero sí que observaciones adyacentes a estas bandas conviene que sean realizadas en ese tramo horario.

El Scan 1 muestra un espectro significativamente más limpio que el 0, como se intuye del espectro instantáneo de la Figura 4.10 y se verifica en el espectrograma de la Figura 4.14.

No obstante, aquí es preciso puntualizar que estas mediciones fueron realizadas con anterioridad a las adjudicaciones del IFT en banda de 3.5 GHz para 5G, y por otro lado aquí tampoco se ven reflejadas eventuales señales satelitales en banda C, puesto que la antena estaba instalada dentro de un edificio, y tampoco se contó con un amplificador antes del espectrómetro.

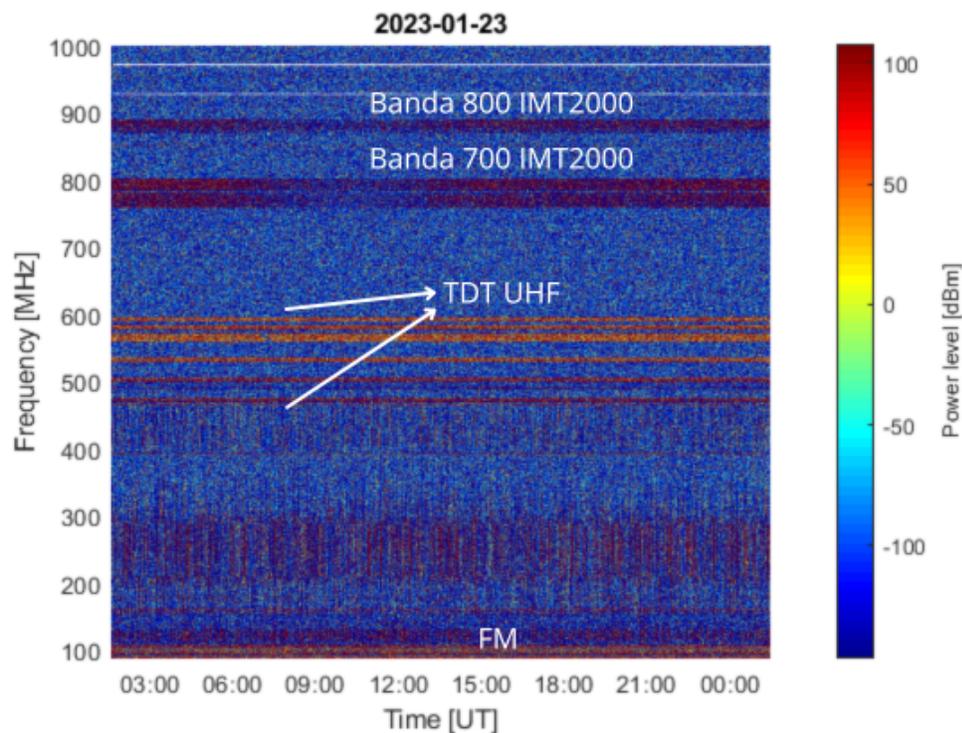


Figura 4.11: Espectrograma del 23/1/2023 en Morelia, correspondiente al escaneo 0 (88-1000 MHz).

4.3.2. RFI en Manga

La tecnología 5G abarca esencialmente tres bandas cuyo uso depende del tipo de aplicación: la banda baja, en torno a los 700 MHz, media, en torno a 3500MHz y conocida también como banda 3.5, y la alta entre ~24-28 GHz. De estas tres, en Uruguay se ha desplegado infraestructura en banda 3.5 y de forma incipiente en banda alta (Antel en 27.5-28.35 GHz).

El principal problema de RFI en la Estación Terrena de Manga en banda C proviene justamente de una radiobase de 5G de la empresa Movistar que opera en la banda de 3.5 GHz. El bloque adjudicado a la empresa en la subasta de 2023 abarca el rango 3.7-3.8 GHz.⁷

Esta señal se muestra en la Figura 4.15, en la que se aprecian además los bloques asignados a la empresa Dedicado para su servicio de transmisión de datos local de distribución multipunto (Wi-Max, a 3425-3450 y 3525-3550 MHz). La señal que se observó a ~4.1 GHz es del satélite Intelsat-35, que estaba unas decenas de minutos fuera del haz principal de la antena ($Az=34.8^\circ$). Al apuntar la antena a la posición del satélite esta señal se incrementó de forma significativa (ver Figura 4.15, der.).

El puerto al que se conectó el analizador de espectro para observar estas señales (indicado como "POL A (-20dB)") es un puerto de monitoreo que tiene una atenuación de unos 6dB con respecto a la señal que proviene directo del LNA.

⁷Los bloques adjudicados a las empresas Claro y Antel son 3.4-3.5 y 3.6-3.7 GHz, respectivamente.

4.3. Desafíos para proyectos de reconversión

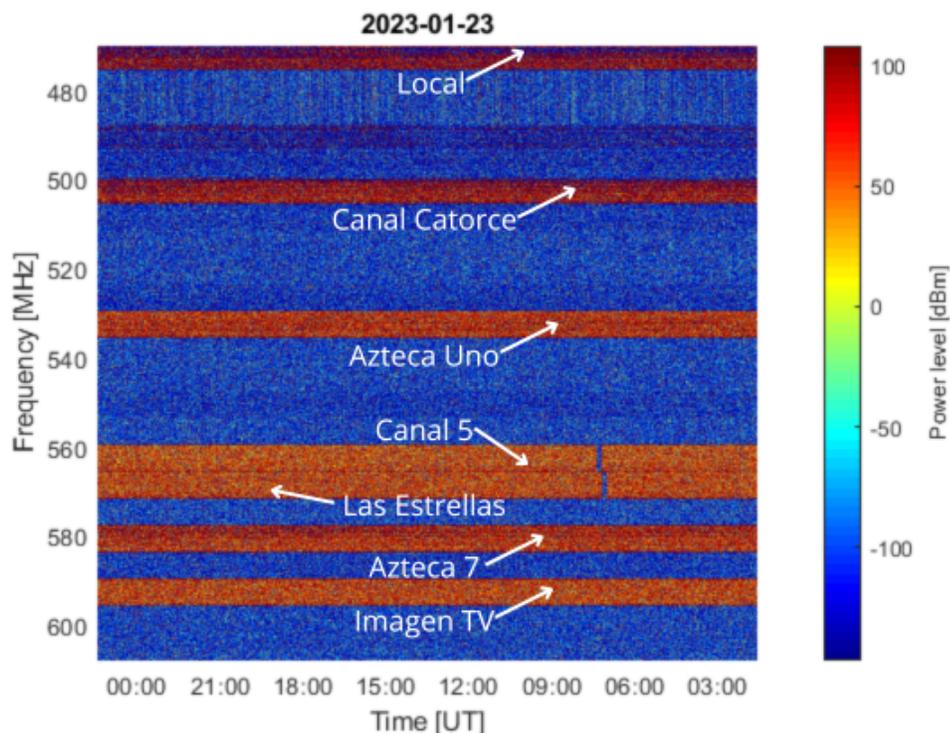


Figura 4.12: Espectrograma ampliado en la banda de UHF destinada a TV, con la identificación de las señales de la Tabla 4.4, más una señal con estación en Pátzcuaro (Azteca Uno).

Acciones de mitigación

La potencia de las señales de RFI presentes en Manga y descritas en el apartado anterior, entre los ~ 3500 - 4100 MHz, tiene una importante variabilidad en el tiempo, particularmente la de 5G. En una medición del continuo de radio que incluya estas señales, esa variabilidad se traducirá en una señal más ruidosa que en alguna banda que no las contenga.

En etapas tempranas de proyectos de reconversión, difícilmente las antenas involucradas posean en sus ACU rutinas para el seguimiento de objetos celestes. Por ello, en primeras mediciones de prueba que uno pueda desear realizar con el hardware disponible, es esperable que ellas sean tránsitos de fuentes a través del haz principal de la antena.

La variabilidad de la potencia de las señales RFI se evidencia en la Figura 4.16, que muestra una serie temporal de 30 minutos de la potencia total en RF medida por el radiómetro descrito en el Capítulo 5, al conectarlo al puerto "POL A..." de la antena 3A.

A pesar de la variabilidad en la potencia detectada, es posible filtrar estas variaciones mediante un suavizado de mediana móvil, que es esencialmente un filtro paso bajo.

En la misma Figura 4.16 se muestra, debajo de la señal cruda, la señal filtrada con dos ventanas distintas, de 5 y 20 segundos. Como se aprecia claramente, ya un filtrado de 5s de ventana genera un suavizado aceptable. Una ventana de 20s no genera una mejora apreciable, y por otra parte el tamaño de esta ventana es una fracción significativa de la duración del tránsito de una fuente radioastronómica, por lo que puede afectar también la señal deseada.

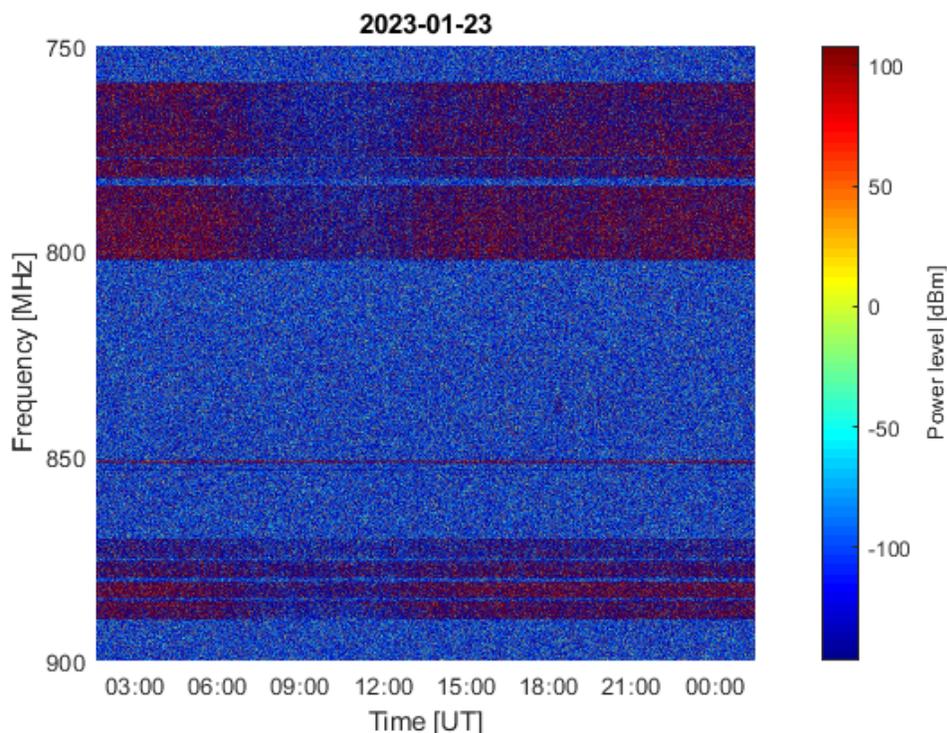


Figura 4.13: Espectrograma ampliado en las bandas de 800 (869-894 MHz) y 700 (758-803 MHz) para IMT (Ver informe IMT en Mexico", del IFT, disponible (30/1/2024) aquí).

4.4. Conclusiones

El ambiente de RFI a lo largo de la vida útil de un radiotelescopio no es algo estático. Los usos del espectro radioeléctrico van cambiando con el desarrollo tecnológico, aunque la tendencia general es que el espectro disponible para radioastronomía está cada vez más afectado por las interferencias.

Ello impone la necesidad, por un lado, de monitorear permanentemente el ambiente de RFI del radioobservatorio, y por otro, el desarrollar nuevas acciones de mitigación que en general son de carácter reactivo, y se vinculan con el procesamiento de las señales ya contaminadas en menor o mayor medida.

Para el monitoreo del ambiente de RFI del radiotelescopio de Tulancingo se configuró un espectrómetro de amplio rango (hasta 18 GHz) y se testeó su uso, analizando datos primarios para lo cual se desarrolló una aplicación con interfaz gráfica que permite generar espectrogramas, espectros instantáneos, así como estadística básica de bloques o porciones de espectro.

Por otro lado, se realizó una caracterización del ambiente de RFI en la ETM, en la banda de operación del receptor de la antena 3A. Para ello se utilizó un analizador de espectro portátil disponible en la ETM, que permitió visualizar las señales de una radiobase 5G próxima a la estación (3.7-3.8 GHz), así como la señal de un servicio Wi-Max en el entorno de 3.5 GHz.

La potencia de estas señales presentan una variabilidad significativa en el tiempo, que puede ser filtrada mediante un suavizado de mediana móvil, con ventanas de algunos segundos.

4.4. Conclusiones

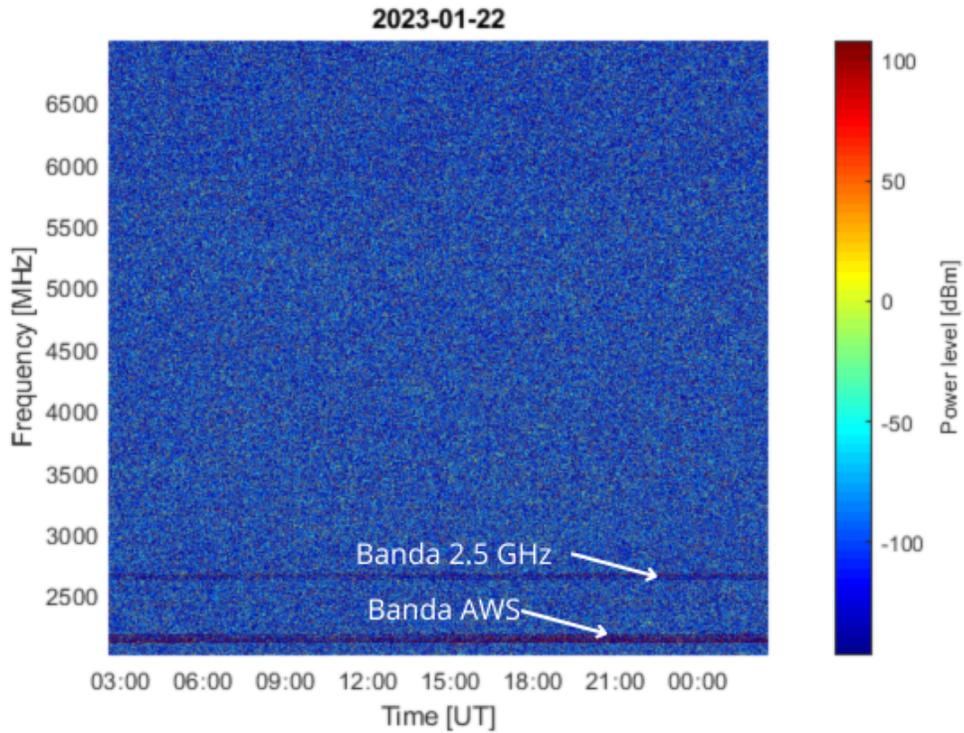


Figura 4.14: Espectrograma del 22/1/2023 en Morelia, correspondiente al escaneo 1 (2000-7000 MHz).

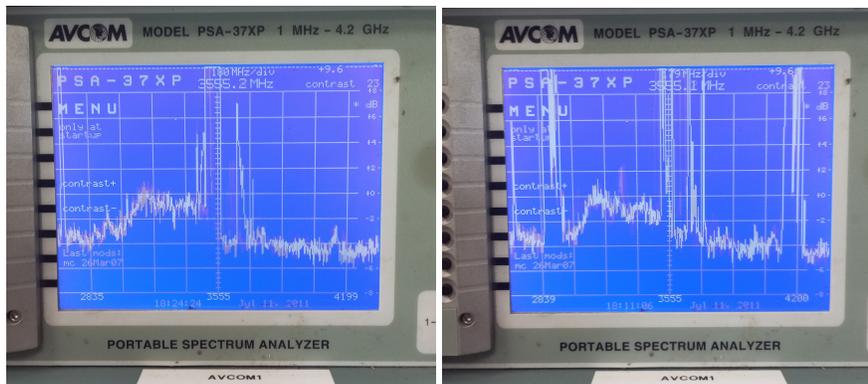


Figura 4.15: Analizador de espectro conectado al puerto indicado "POL A (-20dB)" en la sala de control de la antena 3A, que muestra las señales de RFI de 5G, Wi-Max y del satélite Intelsat 35 a ~4.1GHz (esta última se aprecia más claramente en la figura de la derecha, cuando se apuntó la antena al satélite).

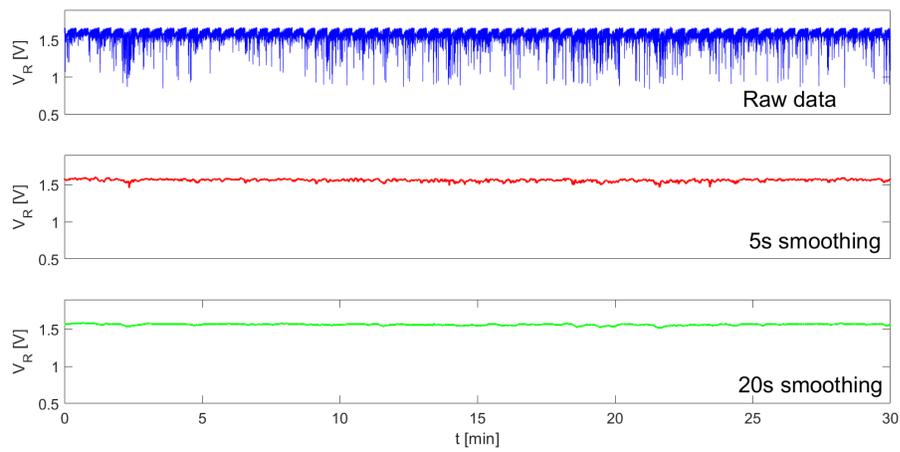


Figura 4.16: Serie temporal de 30 minutos de la potencia total detectada en la antena 3A (arriba), y señales resultantes de aplicar suavizados de mediana móvil de 5 (medio) y 20 (abajo) segundos.

Capítulo 5

Back-ends para caracterización y detecciones tempranas

En este capítulo se describe un conjunto de desarrollos de hardware y software realizados, vinculados a backends digitales que permiten, de forma costoefectiva, ser utilizadas tanto como herramientas para caracterizar la infraestructura disponible (en etapas tempranas o en etapas de *commissioning*), como para realizar primeras detecciones.

Los diseños que se describirán en este capítulo, ponen de manifiesto las potencialidades del uso de dispositivos SDR (acrónimo de *Software-defined Radio*) como *backends* digitales para radiotelescopios. Los SDR son esencialmente dispositivos de hardware que permiten la programación del procesamiento de señales RF que realizan, a través de sencillos diseños, en general realizados en el software de código abierto y gratuito *gnuradio*¹. La flexibilidad que implica esta filosofía le otorga una gran versatilidad, al poder utilizarse un único hardware en distintos y fácilmente configurables modos.

A su vez, la programación en *gnuradio* se realiza a través de un diagrama (en adelante, flowgraph) basado en bloques que se arrastran al espacio de trabajo e interconectan entre sí de forma sencilla e intuitiva, y/o a través de códigos en Python. Ejemplos de bloques son integradores, calculadores de FFT, bloques que representan el SDR que se desea programar, múltiples bloques para visualización de datos, etc.

En tal sentido, se desarrolló un *backend* digital basado en un SDR Ettus USRP X300, con el fin de ser utilizado en el Proyecto de Tulancingo para detecciones iniciales (*first light detections*). Este desarrollo consistió en el diseño de un flowgraph para utilizar el SDR como radiómetro (para mediciones del continuo de radio), y un segundo para ser utilizado como espectrómetro (para detección de líneas espectrales). Estos diseños, realizados y testeados en el laboratorio de instrumentación del Instituto de Radioastronomía y Astrofísica (IRyA) de la UNAM-Campus Morelia, se describen en el apartado 5.1, y fueron posibles gracias al apoyo económico del Programa de Movilidad de Intercambio Académico (MIA) de CSIC-Udelar, así como del apoyo del personal técnico del laboratorio y su coordinador, Dr. Stan Kurtz. El autor elaboró asimismo un manual de uso de estos flowgraph para el personal involucrado en el Proyecto de Tulancingo.

Posteriormente, una vez obtenida la autorización por parte de Antel para utilizar la infraestructura de la ETM para la presente tesis, se abordó el desarrollo del hardware y software de un radiómetro, basado en un detector de potencia marca MiniCircuits, modelo ZX47-60LN+. Este

¹En el <https://www.gnuradio.org/> del proyecto GNU Radio puede descargarse el software, así como acceder a documentación y registrarse en su foro, integrado por una creciente comunidad de desarrolladores y usuarios.

Capítulo 5. *Back-ends* para caracterización y detecciones tempranas

Parámetro	Valor
Rango frecuencias	DC-6GHz
Ancho de banda base	160 MHz
Frec. muestreo	Hasta 200 MS/s por canal
Número de canales por subdevice	2

Tabla 5.1: Principales características del SDR Ettus USRP X300.

desarrollo fue posible gracias al apoyo económico de la Beca de ADUR-Fcien², así como de Pedeciba-Física³. El diseño y primeras pruebas de laboratorio de este instrumento se describen en el apartado 5.2, mientras que los resultados obtenidos mediante su uso en la antena 106 de la ETM se reportan y discuten en el Capítulo 6.

5.1. Desarrollos con Ettus USRP X300

En esta sección se describen los flowgraph diseñados para los modos radiómetro y espectralómetro, pensados para utilizarse junto con un receptor en banda L en la antena de Tulancingo.

El Ettus USRP X300 es un SDR cuyas principales características se resumen en la Tabla 5.1. Consiste esencialmente en una matriz de puertas lógicas programable en campo (FPGA, por su sigla en inglés) Kintex-7. Una FPGA es básicamente un arreglo o matriz de bloques lógicos (321k en el caso de Kintex-7) y puertas I/O, todo lo cual puede ser programable para efectuar desde tareas sencillas a arquitecturas más complejas que involucran también periféricos como microprocesadores. En el caso del X300, esos periféricos son el *front-end* de radio, que incluye un conversor analógico-digital (ADC, por su sigla en inglés) de 14 bit y 200 MS/s, e interfaces de alta velocidad como 10 GigE, 1 GigE y PCIe. El FPGA es capaz de realizar todo el procesamiento digital de la señal (DSP, por su sigla en inglés), y su programación se realiza a través de *gnuradio*. Además, es multiplataforma y puede programarse tanto en Linux como en Windows.

Cada USRP X300 tiene una tarjeta madre, la cual tiene dos "subdevice slots", A y B, cada uno de los cuales tiene 2 canales. El utilizado aquí posee un único slot.

El USRP X300 permite además sincronización externa a través de un receptor GPS, que fue incorporado en este caso. La señal RF fue conectada al canal 1, mientras que el canal 2 se conectó a una carga matcheada de 50Ω, ambos del subdevice A (ver Figura 5.1).

Para realizar pruebas de validación del funcionamiento de los flowgraph diseñados, se dispuso además de un generador de señal marca Agilent modelo N5818b (9kHz-6GHz), que se muestra en la Figura 5.2.

5.1.1. Radiómetro

Como *back-end* digital del receptor en banda L para Tulancingo se diseñó el flowgraph que se muestra en la Figura 5.3, siguiendo la base del diseño descrito en [Tapping, 2022].

Siguiendo el sentido que marcan las flechas en el diagrama, que es a su vez el sentido secuencial del procesamiento digital de la señal (DSP), el primer bloque (más a la izquierda) es el que permite configurar el Ettus, fijando parámetros como la frecuencia de muestreo, frecuencia central RF y ancho de banda. Todos estos parámetros se setean en los bloques que se encuentran

²Asociación de Docentes de la Universidad de la República-Facultad de Ciencias

³Programa de Desarrollo de las Ciencias Básicas.

5.1. Desarrollos con Ettus USRP X300



Figura 5.1: Imagen del Ettus USRP X300 utilizado. El círculo rojo marca los canales de entrada del subdevice A.

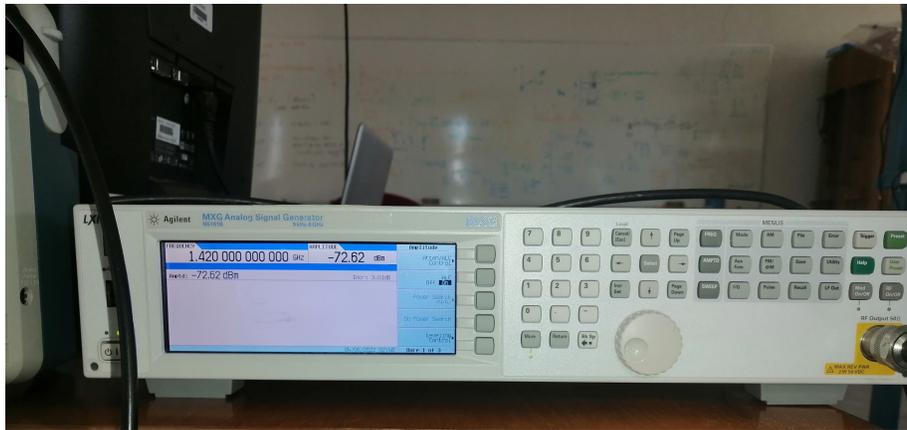


Figura 5.2: Imagen del generador de señales Agilent modelo N5818b utilizado para testear los flowgraph diseñados.

en la parte superior del diagrama, que son bloques de variables. Las variables son "integration-Time", "BW" y "samp_rate_0" que permiten setear el tiempo de integración, ancho de banda y tasa de muestreo, respectivamente.

El muestreo que realiza el SDR es del tipo IQ, y los bloques "Complex to Mag²" aplicados a los datastreams del Canal 1 (señal RF) y 2 (carga matchheada) computan la potencia total de las respectivas señales.

El bloque siguiente sustrae ambas potencias, pues la idea con este diseño es ser una alternativa a un radiómetro de Dicke tradicional, donde al canal 2 ingresa una señal de un diodo de ruido que es amplificado por un LNA idéntico al del receptor "de ciencia", que se encuentra en idéntico ambiente que este.

El siguiente bloque filtra la señal a través de un filtro IIR de un solo polo (filtro paso bajo), y finalmente el bloque "Keep 1 in N" realiza el muestreo efectivo de salida cada 100ms (seteable

Capítulo 5. Back-ends para caracterización y detecciones tempranas

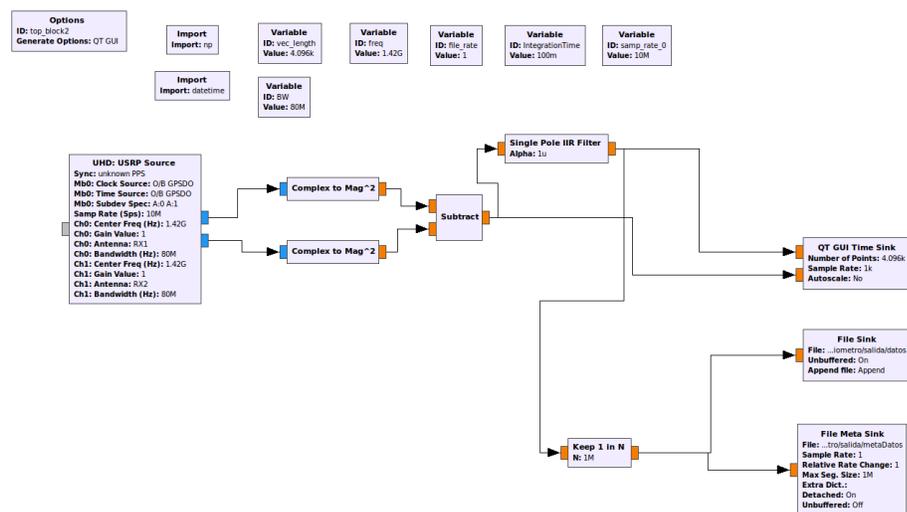


Figura 5.3: Flowgraph del radiómetro para banda L.

como ya se dijo a través de la variable "integrationTime").

Hasta aquí el diagrama contiene los bloques esenciales que realizan el procesamiento digital de los dos datastreams. Los bloques más a la derecha del diagrama son simplemente bloques para visualización en tiempo real ("QT Gui Time block") y guardado en un archivo de salida ("File Sink").

Para verificar el correcto funcionamiento del diagrama, se inyectó un *sweep* en amplitud con el generador de señal, de paso 100ms, 100 puntos, potencia inicial -40dBm y máxima -20dBm. La respuesta del radiómetro es la que se muestra en la Figura 5.4, donde se verifica el correcto funcionamiento en general de todo el diagrama.

5.1.2. Espectrómetro

El flowgraph del espectrómetro se muestra en la Figura 5.5. Se trata esencialmente de un espectrómetro FFT, donde el bloque homónimo es el que realiza la transformada rápida de Fourier. Los dos bloques siguientes hallan el espectro de potencia a partir de ella, y finalmente se visualiza en tiempo real con un "QT Gui Time Sink" y se guarda la sesión en un archivo a través del bloque "File Sink".

La frecuencia central de este espectrómetro está seteada en 1420 MHz pues será utilizada en Tulancingo para detectar la línea de 21cm de Hidrógeno como parte del conjunto de primeras detecciones. No obstante, este parámetro es fácilmente seteable, modificando la variable "freq". Las demás variables seteables se llaman "integration_time", "BW", "samp_rate" y "channelWidth" y refieren a tiempo de integración, ancho de banda, tasa de muestreo y resolución espectral, respectivamente.

5.2. Radiómetro analógico

En esta sección se describe el diseño, construcción, pruebas de laboratorio y ajustes finales de un radiómetro simple (1.8-6.0 GHz), que, junto a las antenas 3A y 106 de la ETM, posibilita la realización de mediciones del continuo de radio.

5.2. Radiómetro analógico

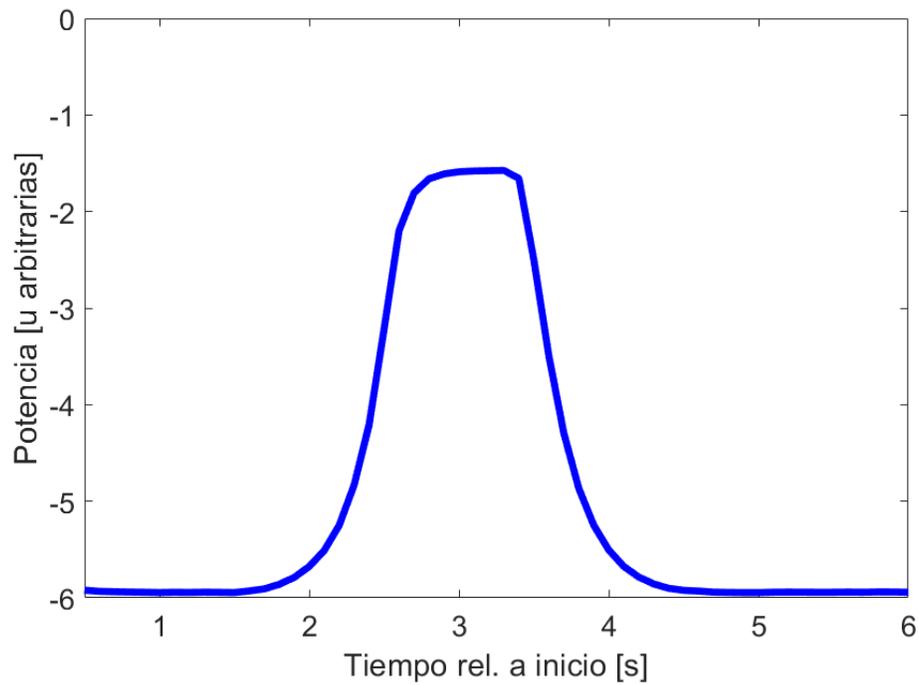


Figura 5.4: Salida generada por el diagrama de flujo del radiómetro para banda L, al inyectarle un sweep en amplitud con el generador de señal.

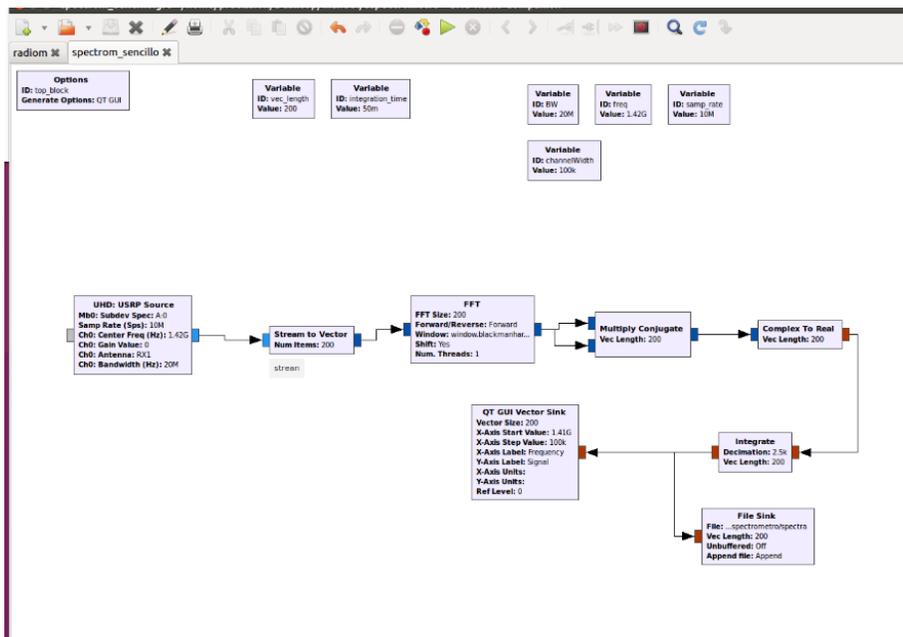


Figura 5.5: Flowgraph del espectrómetro para banda L.

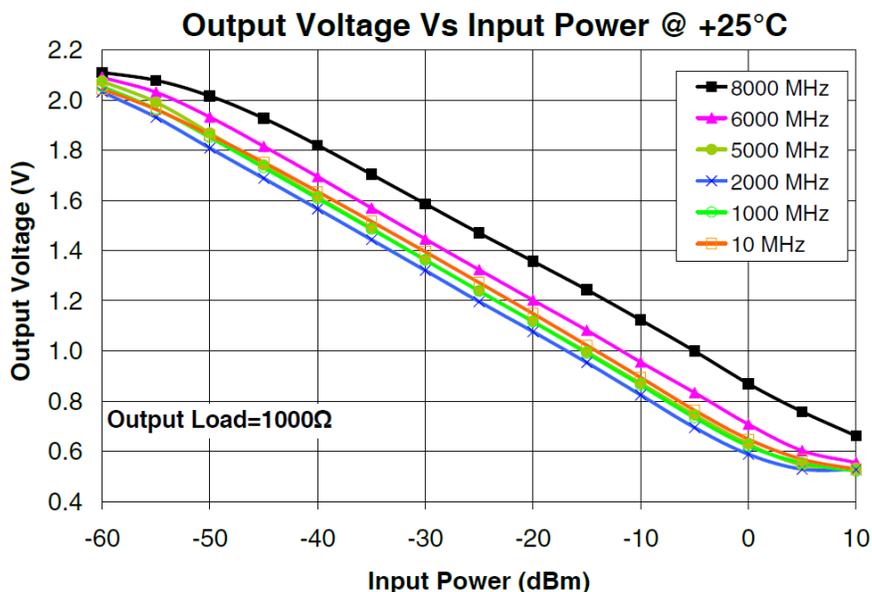


Figura 5.6: Curvas de respuesta del detector de potencia MiniCircuits ZX47-60LN+ (Fuente de imagen: hoja de datos del fabricante).

5.2.1. Diseño

El diseño del prototipo comprendió aspectos tanto de hardware como de software, que se describen por separado en los siguientes sub-apartados.

Hardware

El corazón del radiómetro lo constituye el detector de potencia de MiniCircuits ZX47-60LN+, un dispositivo que convierte potencia total en RF entre 10-8000 MHz en una tensión de salida entre 0.5-2.10V, con una pendiente nominal de unos -25 mV/dB.

Las curvas de respuesta versus potencia de entrada, para distintas frecuencias se muestran en la Figura 5.6.

La salida de este detector es conectada a una de las entradas analógicas de una tarjeta de desarrollo Arduino UNO. El componente cuenta además con un sensor interno de temperatura, cuya señal es conectada a otra de las entradas analógicas del Arduino.

La tarjeta Arduino es a su vez conectada a una miniPC por cable USB, que también alimenta la placa. Todos los componentes se albergan dentro de una caja de PVC estanca IP65, de 170X170x75 mm.

Software

El código cargado al microcontrolador de la tarjeta de desarrollo lo que hace esencialmente es imprimir el promedio de diez lecturas de las entradas analógicas, espaciadas 10 ms. El período efectivo de impresión de datos en la salida serial es pues de 100 ms.

La miniPC a la que está conectada la placa Arduino corre en Windows 7, y en ella se ejecutan dos scripts de Python. El primero (*main1.py*) lee del puerto serial a un período fijado por el usuario al inicio, y asigna a cada muestra el tiempo UNIX (expresado en segundos transcurridos

5.2. Radiómetro analógico

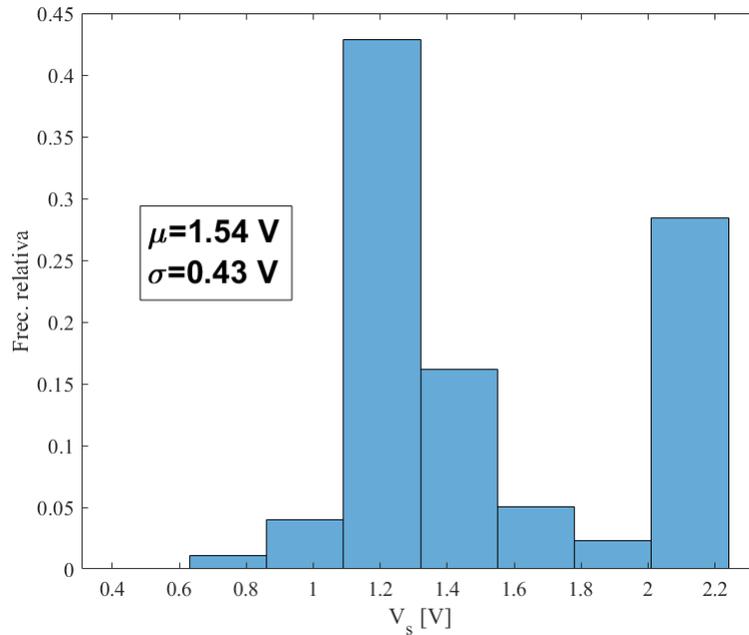


Figura 5.7: Histogramas de series de datos adquiridos con el radiómetro en la primera configuración (ver texto).

desde 1970-01-01 00:00:00 UTC) obtenido del reloj de la PC. Este reloj es a su vez sincronizado mediante la aplicación NetTime, como se describe en el Capítulo siguiente. El segundo script (*main2.py*) permite visualizar en tiempo real los datos, con una ventana temporal fijada por el usuario al ejecutarlo.

Todos estos códigos están accesibles en el repositorio *git-hub* del autor⁴

5.2.2. Pruebas de laboratorio

La primera versión del código cargado en la placa de desarrollo imprimía una lectura por segundo en el puerto serial. A su vez, el detector se alimentaba de la salida de 5.0V de la placa Arduino.

Un día de datos generados con esta primera versión, sin ninguna señal a la entrada del puerto de RF, se muestra en el histograma de la Figura 5.7. Como puede verse, la señal es extremadamente ruidosa, en parte porque la generación de datos no involucraba ningún tipo de promediado previo, y en parte porque claramente la placa introducía ruido a través de la alimentación al detector.

Otro problema que se detectó fue que luego de un tiempo la escritura al puerto serial se "congelaba", perdiéndose por lo tanto datos.

En una segunda configuración del hardware y del software del prototipo, se realizaron las siguientes modificaciones:

- Tasa de muestreo de 10 Hz
- Cada lectura es el promedio de 10 lecturas, realizadas cada ~10 ms
- Alimentación de detector independiente, a través de una fuente externa de 5VDC.

⁴<https://github.com/jmcaldas/radiometer>.

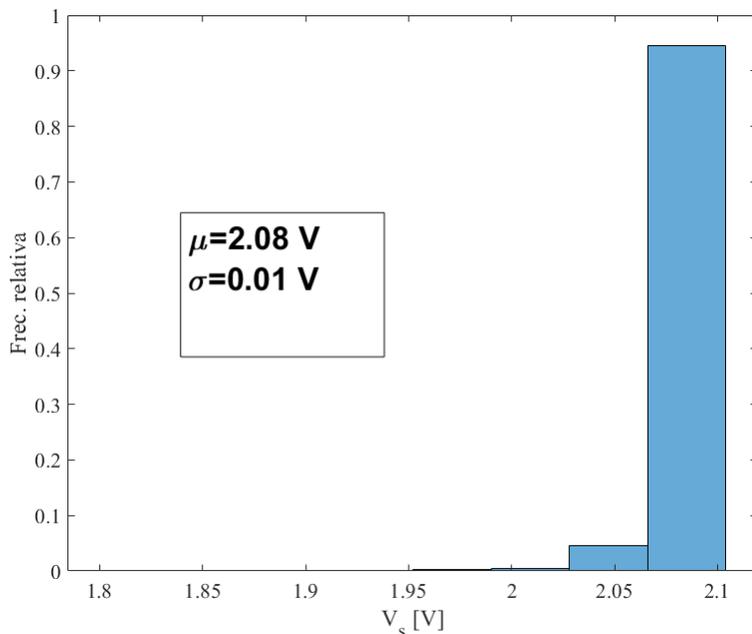


Figura 5.8: Histogramas de series de datos adquiridos con el radiómetro en la segunda configuración (ver texto).



Figura 5.9: Imagen de un Ettus B200 mini. El canal de TX está conectado al RX2 a través de un atenuador de 30 dB, a los efectos de verificar el funcionamiento deseado.

- Inclusión al final de cada escritura de un llamado a la función *serial.flush*. Esta función fuerza a esperar a que la escritura de datos al puerto serial finalice, y eliminó el problema de pérdida de datos descrito anteriormente.

Las mejoras se ven reflejadas en el histograma de la Figura 5.8.

Para esta etapa de optimización del código tanto de la placa de desarrollo como de adquisición de datos se contó con la ayuda de un SDR Ettus USRP B200 mini, provisto por el Departamento de Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República. El dispositivo permitió además evaluar la respuesta del radiómetro a señales de entrada controladas.

El Ettus b200 mini permite tanto la recepción como la transmisión de señales entre 70 MHz y 6GHz, con un ancho de banda máximo de 50 MHz. Una imagen del SDR se muestra en la Fig. 5.9.

Las pruebas de laboratorio consistieron en generar con el SDR una señal de 4.0 GHz modulada en amplitud con un pulso gaussiano, para simular el pasaje de una fuente de radio extraterrestre puntual a través del haz de la antena.

5.2. Radiómetro analógico

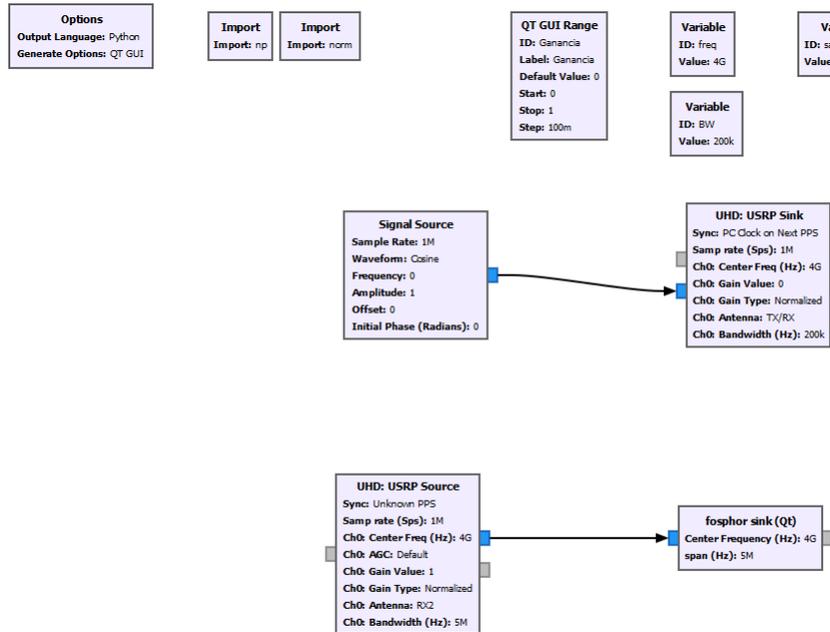


Figura 5.10: Flowgraph de gnuradio para generar una señal de 4GHz, de potencia variable manualmente.

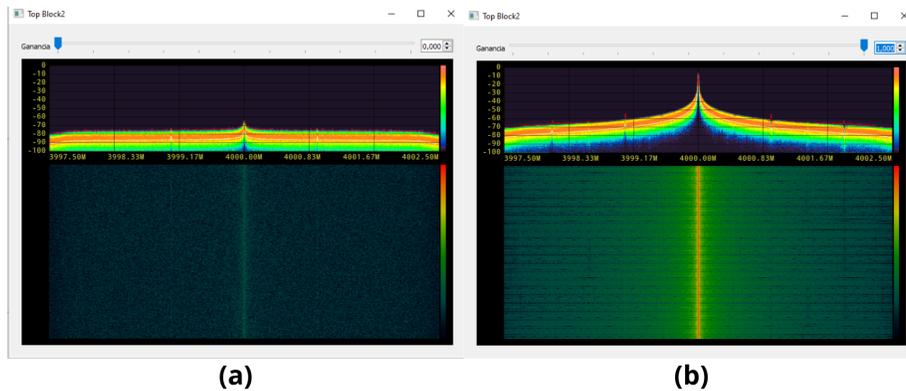


Figura 5.11: Espectros y espectrogramas de la señal de 4 GHz generada por el SDR, para ganancia nula (a) y máxima (b).

Para ello, se comenzó con el flowgraph de la Fig. 5.10. El bloque "Fosfor Sink" permite visualizar espectros y espectrogramas (ver Figura 5.11), y la amplitud de la señal se fija manualmente a través del deslizador en la parte superior de la ventana de visualización.

El siguiente paso fue incluir un bloque "Vector source" que genera el pulso gaussiano que modula la señal en banda base (bloque "Signal Source") para generar el efecto de la convolución de una señal puntual con el haz principal (gaussiano) de una antena, y obtener la respuesta del radiómetro.

Capítulo 5. Back-ends para caracterización y detecciones tempranas

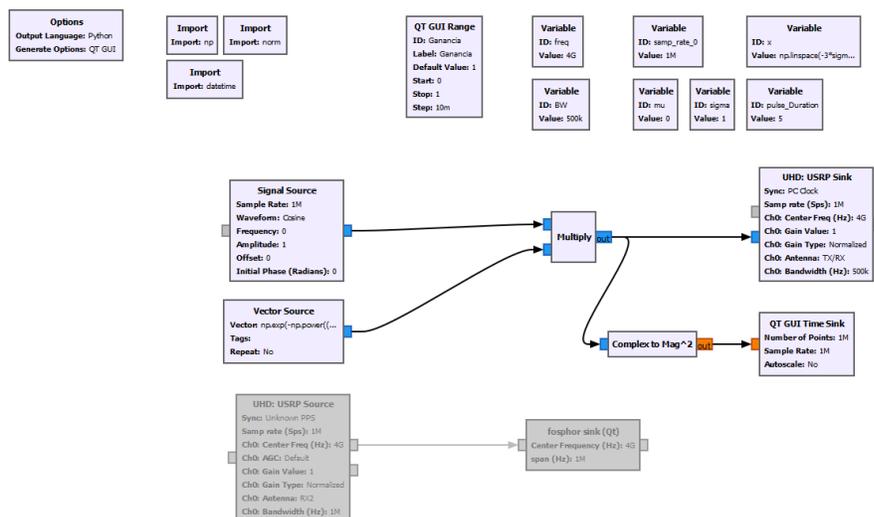


Figura 5.12: Flowgraph para la generación de un tono modulado en amplitud por un pulso o tren de pulsos gaussianos.

Como se describió en el Capítulo 3, la antena 3A tiene un HPBW de unos 18' a 4GHz, mientras que el HPBW de la 106 es de 24' en banda Ku, y 72' en banda C. Por otra parte, la 2A operando a 8 GHz⁵ tiene un HPBW de unos 5'. Considerando el desplazamiento angular de 15'/min del movimiento general diario, estos anchos se traducen en 1.3 min para la 3A en banda C, 1.6 y 4.8 min para la 106 en banda Ku y C, respectivamente, y 20 segundos para la 2A a 8GHz.

Para evaluar si el radiómetro es capaz de responder a este tipo de señales de forma satisfactoria, se escogió un pulso de duración ($\pm 3\sigma$) igual a 15 segundos, representativo del más rápido de los tránsitos que es esperable obtener con estas antenas.

La figura 5.13 muestra la respuesta del radiómetro a un pulso generado con el flowgraph de la Figura 5.12, y un ajuste polinómico superpuesto. La razón por la que se ajusta un polinomio (de grado 2) es que el radiómetro produce una señal proporcional al logaritmo de la potencia de RF, por lo que una gaussiana se vuelve una parábola, como muestra la Ec. 5.1.

$$f(x) = 10 \log \left(a_1 \cdot e^{-\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \right) = 10 \log(a_1) - \log(e) \cdot \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2 \quad (5.1)$$

El FWHM obtenido a partir del ajuste es de 4.18s, en perfecta concordancia con el de la señal moduladora (4.16s).

5.2.3. Ajustes finales

Una vez testeado el hardware en laboratorio, fue instalado en la sala de control de la antena 106 de la ETM, y conectado a su señal en banda Ku. El motivo por el que se escogió esta banda es que el nivel de ruido es significativamente menor que en banda C, contaminada por RFI de las señales de 5G y Wi-Max descritas en el Capítulo anterior. Luego de una serie de pruebas se estimó conveniente incluir una etapa adicional de amplificación a la entrada del radiómetro, utilizando un LNA de MiniCircuits modelo ZX60-63GLN+. Las principales características técnicas

⁵Esta frecuencia es el límite superior del receptor dual de Tulancingo, basado en LNAs de 4-8GHz.

5.2. Radiómetro analógico

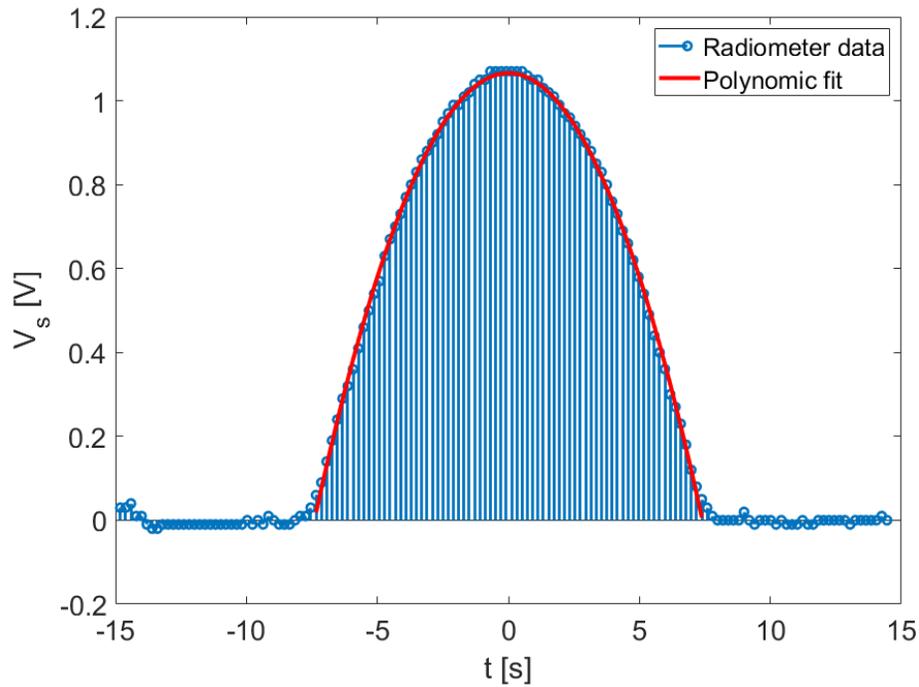


Figura 5.13: Señal medida por el radiómetro, para señal moduladora de duración ($\pm 3\sigma$) 15 segundos. El período de muestreo fue de 200 ms.

de este amplificador se muestran en la Tabla 5.2, y una imagen del interior del radiómetro en su diseño final se muestra en la Figura 5.14.

Se adquirió asimismo un ADC marca HiLetgo ADS1115 de 16 bit, para mayor resolución que la que ofrece el ADC incluido en la placa Arduino UNO (10 bit), pero su incorporación al prototipo no fue incluida en los resultados que se reportan en el Capítulo que sigue, quedando para un desarrollo futuro.

Característica	Descripción
Figura de ruido	0.9 dB
Ganancia	28-31.5 dB
Pérdidas retorno entrada	6 dB
Pérdidas retorno salida	10 dB
Voltaje operación	5.0 V

Tabla 5.2: Características del LNA MiniCircuits modelo ZX60-63GLN+. Todos los valores corresponden a lo especificado en hoja de datos para 1.8 GHz.

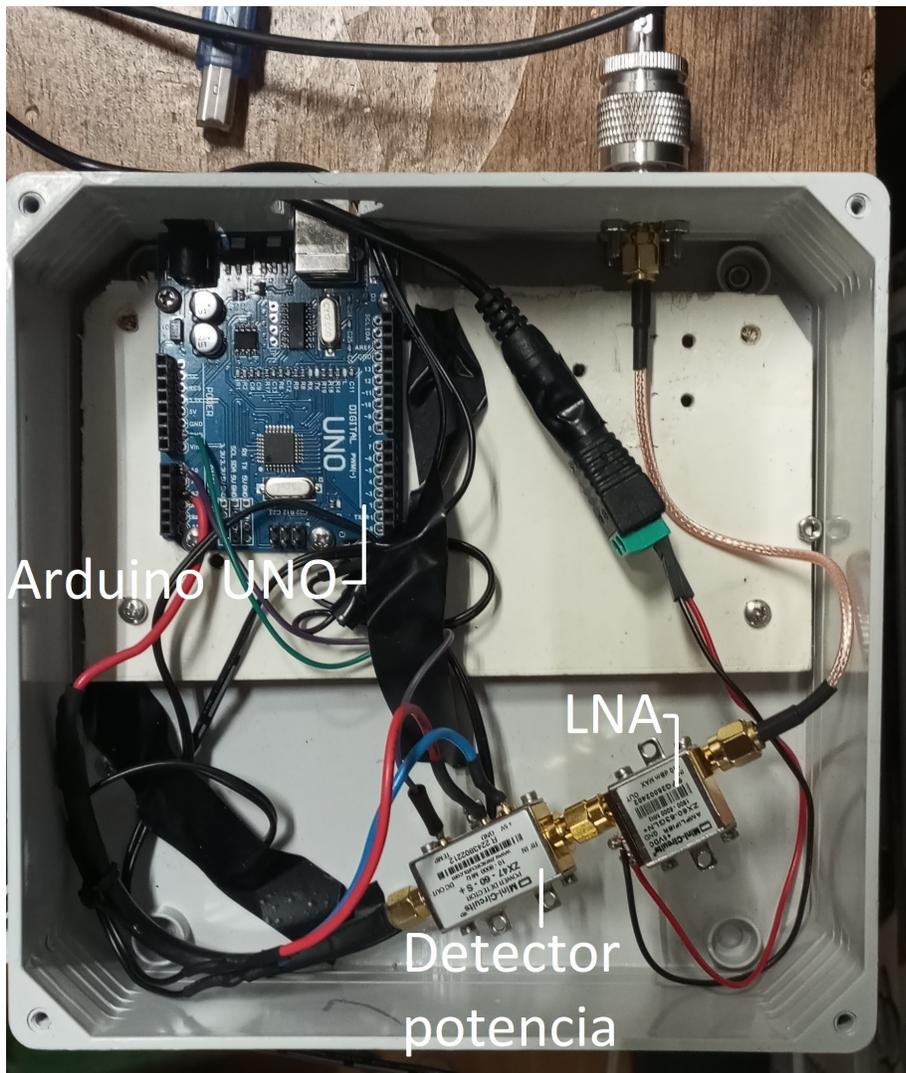


Figura 5.14: Vista interior del radiómetro en su diseño final.

Capítulo 6

Modelo de apuntamiento y drift-scans con antena 106

6.1. Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos con la antena 106 de la ETM y el radiómetro descrito en el capítulo anterior, en detecciones que posibilitaron generar un modelo de apuntamiento, y con él, detectar tránsitos del Sol y la Luna. Los resultados obtenidos permiten establecer las posibilidades y limitaciones de este equipamiento, sea como instrumento científico o como herramienta principalmente formativa.

Estos resultados y otros no incluidos en la presente tesis, forman parte de un artículo en preparación a enviarse a *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, de SPIE.

Primero, en el apartado 6.2 se fundamenta la importancia en radioastronomía de contar con un modelo de apuntamiento preciso y que cubra la mayor parte posible de cielo, lo cual constituye un aspecto crítico. En el apartado 6.3 se repasa nuevamente las principales características del hardware utilizado. En la sección 6.4 se describe la metodología utilizada, mientras que en 6.5 se presentan los resultados obtenidos. Finalmente, se discuten estos resultados en 6.6, y se esbozan las conclusiones y perspectivas futuras de este trabajo en 6.7.

6.2. Fundamentación

Un modelo de apuntamiento comprende una función $f(A,E)$ que convierte coordenadas deseadas (A,E) en coordenadas comandadas a la unidad de control de antena (A_{ACU}, E_{ACU}) . El modelo busca minimizar los errores de apuntamiento $\epsilon_A = \text{abs}(A - A_{ap})$ y $\epsilon_E = \text{abs}(E - E_{ap})$, donde los subíndices "ap" refieren al apuntamiento real de la antena. El esquema de la Figura 6.1 ilustra cómo a partir de las (A,E) deseadas, el modelo genera un par de coordenadas (A_{ACU}, E_{ACU}) , redondeadas a la apreciación del ACU, que son ingresadas a este y posicionan la antena en (A_{ap}, E_{ap}) , próximo a la dirección deseada.

Los errores de apuntamiento en radioastronomía contribuyen significativamente a la sensibilidad del sistema en su conjunto. Para ilustrar esto, si consideramos un haz gaussiano:

$$g(\theta) = \exp\left\{-\frac{4\ln(2)\theta^2}{FWHM^2}\right\} \quad (6.1)$$

podemos expresar la atenuación en dB, en función de la variable $x = \theta/FWHM$ de la siguiente forma:

$$y = 10\log(g(x)) = -12,04x^2 [dB] \quad (6.2)$$

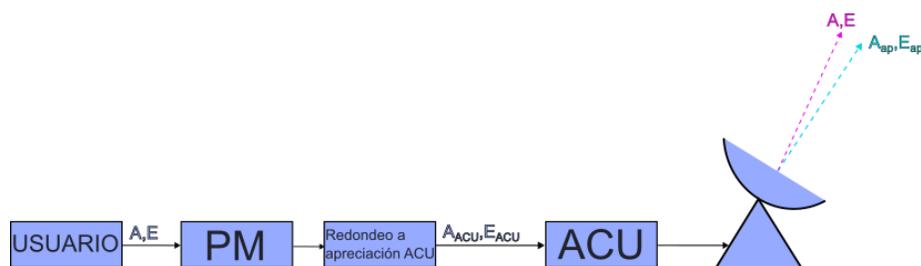


Figura 6.1: Esquema de bloques que ilustra el pasaje de coordenadas deseadas (A,E) a comandadas al ACU de la antena (A_{ACU}, E_{ACU}), a través de un modelo de apuntamiento (PM).

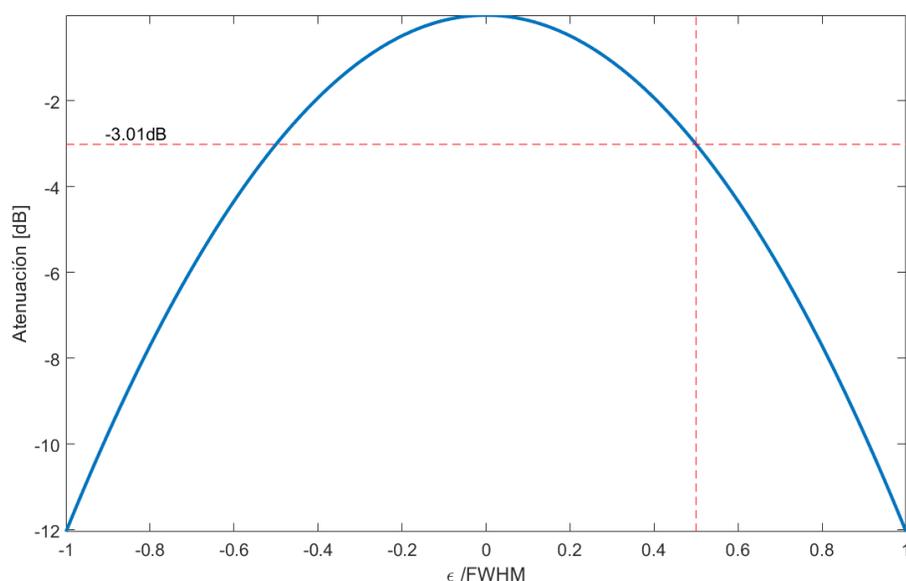


Figura 6.2: Atenuación generada por errores de apuntamiento de un paraboloide, en función del error expresado en fracción del FWHM de la antena.

Esta función se muestra en la Figura 6.2. De la expresión analítica anterior surge que un error de apuntamiento del 10 % del FWHM ($x=0.1$) genera una atenuación de apenas 0.12 dB (97 % del máximo), lo cual es perfectamente admisible y de hecho se adopta comúnmente como el límite superior del error RMS tolerable para cualquier modelo de apuntamiento.

Sin embargo, un error de medio FWHM ($x=0.5$) genera una atenuación de la señal deseada de 3 dB (50 % del máximo), lo cual puede perfectamente significar la no detección de la señal deseada.

El error RMS que se reporta más adelante para el modelo de apuntamiento adoptado, se basa en los errores siguientes asociados a cada punto:

$$\epsilon_i = \sqrt{[\cos(E)(A_{i,d} - A_{i,m})]^2 + (E_{i,d} - E_{i,m})^2} \quad (6.3)$$

donde los subíndices "d" y "m" refieren al dato usado para construir el modelo y al arrojado por el modelo, respectivamente.

6.3. Setup de hardware

Para la obtención de los resultados reportados más adelante, se utilizó la antena 106 de la Estación Terrena de Manga, de 4.2m de diámetro (ver Tabla 3.5). Como se señaló en el Capítulo 3, el foco primario de esta antena se encuentra el feeder con un LNB (*low-noise block converter*) en banda Ku, de frecuencia central 11.55 GHz y ancho de banda 1200 MHz (ver Tabla 3.4). La ganancia del LNA se encuentra entre 52-65 dB. La salida del LNB es en banda L (950-2150 MHz) por cable coaxial hasta el cuarto de control donde se encuentra el radiómetro descrito en el Capítulo 5. El detector de potencia, tal como se describió en el Capítulo 5, convierte linealmente la potencia en RF en una tensión de salida, con un rango dinámico de 0.5-2.1V y una pendiente nominal de -25mV/dB. A la entrada del radiómetro se incluye un LNA¹ de 0.9 dB de figura de ruido y 28-31.5 dB de ganancia, ambos parámetros a 1800 MHz.

La adquisición de datos del radiómetro fue seteada con un período de muestreo de 200ms. Cada muestra a su vez es el promedio de 10 lecturas. El reloj de la PC utilizada para la adquisición se sincroniza con la aplicación *NetTime*, configurada para sincronizar cada 12 hs. La precisión del tiempo ajustado es típicamente del orden de decenas de milisegundos². Sin embargo, la deriva del reloj de la PC puede llegar a unos 1.6s/día, por lo que se asume que el error máximo en el tiempo asociado a cada muestra es de 800 ms.

6.4. Metodología

Se desarrolló una aplicación con interfaz gráfica en MATLAB, que permite leer los archivos generados por el radiómetro, y realizar distintos postprocesamientos: filtrado, suavizado, y estadística básica de las series temporales contenidas en estos archivos, así como ajustes gaussianos a tránsitos detectados. Una imagen de esta aplicación se muestra en la Figura 6.3.

Esta aplicación permite: (1) visualizar parámetros principales de la serie temporal (tiempo inicio, tiempo final, etc); (2) realizar una reducción básica de los datos, mediante filtrado de media móvil o ventana gaussiana, más resta de línea base, que puede elegirse entre un valor constante a un ajuste polinómico de hasta tercer grado; (3) obtener datos de tránsitos de fuentes brillantes en radio del Tercer Catálogo de Cambridge (3CR), a declinaciones $\delta \leq 10^\circ$; (4) modificar la visualización de datos, "zomeando" en partes de interés; (5) hallar modelos de apuntamiento, controlando el error máximo permitido del ajuste, definido con la Ec. 6.3, así como obtener coordenadas de apuntamiento a partir de las deseadas, y de un modelo previamente hallado; (6) obtener la trayectoria diaria de una de las fuentes del listado de 3CR en (AZ,EL), para una fecha determinada; (7) realizar ajustes gaussianos a datos generados por tránsitos; (8) obtener parámetros estadísticos de la serie temporal cargada, histogramas, etc.

Para el modelo de apuntamiento se utilizó el descrito en [Greve et al., 1996]. En este modelo, las correcciones horizontal (δh) y vertical (δv), definidas respectivamente como $\delta h = \delta A \cos(E)$ y $\delta v = \delta E$, donde $\delta A = A_{ACU} - A$ y $\delta E = E_{ACU} - E$, están dadas por las ecuaciones 6.4 y 6.5.

$$\delta h = P_1 \cos(E) + P_2 + P_3 \sin(E) + P_4 \cos(A) \sin(E) + P_5 \sin(A) \sin(E) + P_6 \sin(A) \quad (6.4)$$

$$\delta v = -P_4 \sin(A) + P_5 \cos(A) + P_6 \cos(A) \sin(E) + P_7 + P_8 \cos(E) + P_9 \sin(E) \quad (6.5)$$

Todos estos parámetros tienen un sentido físico, y es el que se explicita en la Tabla 6.1. Parten de considerar la transformación entre un sistema de coordenadas cartesianas astronómicas (x,y,z), donde z indica la dirección del zenit local, y un sistema instrumental (x',y',z'). Una descripción matemática detallada puede encontrarse en [Meeks et al., 1968].

¹Marca Minicircuits modelo ZX60-63GLN+

²Ver *Accuracy Notes* en el sitio web de la aplicación

Capítulo 6. Modelo de apuntamiento y drift-scans con antena 106

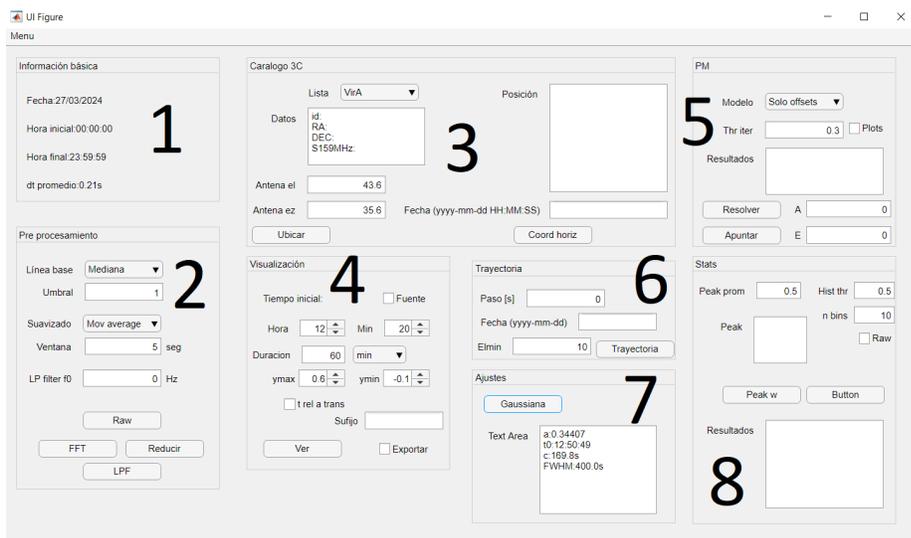


Figura 6.3: Interfaz gráfica de aplicación desarrollada para análisis de datos obtenidos con el radiómetro. Una explicación de cada parte indicada con números se da en el texto.

Los offsets de los encoders de azimut y elevación se expresan en los parámetros P_1 y P_7 , respectivamente. El error de colimación (P_2) se debe a falta de ortogonalidad entre el eje óptico del reflector y el eje de elevación, así como no-linealidad entre el eje óptico y el de azimut en posición de copa ($E=90^\circ$). La no ortogonalidad entre los ejes de azimut y elevación se reflejan en el parámetro P_3 , mientras que P_4 y P_5 refieren a la inclinación del eje de azimut. Los parámetros P_8 y P_9 están vinculados a la deformación gravitatoria de la estructura de la antena, que es función de la elevación, y que ocasiona que el eje óptico se desvíe de la dirección del eje de elevación. Finalmente, el parámetro P_6 refleja los errores en las coordenadas consideradas "verdaderas", y contienen no solamente el error astrométrico sino sobre todo a la metodología en cómo se asigna a una muestra determinada el par (A,E), y que se describe a continuación.

Para generar pares de puntos (A_i, E_i) y sus correspondientes ($A_{ACU,i}, E_{ACU,i}$) se procedía a apuntar nominalmente al Sol, y ajustar manualmente el apuntamiento de la antena hasta obtener el máximo de respuesta del radiómetro. Cuando se llegaba a este valor, se registraba el instante de tiempo correspondiente y las coordenadas del ACU. Este procedimiento se realizó cada aproximadamente 5 minutos, en dos jornadas de aproximadamente 4 horas en torno al mediodía solar ($|AH_{sol}| \leq 2$).

Los instantes de tiempo registrados fueron luego traducidos a coordenadas horizontales utilizando la implementación del algoritmo descrito en [Reda, 2003] contenida en el paquete *Astro-Pack* de MATLAB [Ofek, 2014]³, que es un método numérico de aproximación a las ecuaciones analíticas. La precisión reportada es de $1.08''$.

Finalmente, se halló la solución de mínimos cuadrados al sistema sobredeterminado de ecuaciones lineales generado a partir de las Ecuaciones 6.4 y 6.5.

Una vez que se obtuvo un modelo de apuntamiento, se aplicó la solución para posiciones del Sol y la Luna en tiempos determinados, a los efectos de obtener tránsitos de estas fuentes, es decir, curvas temporales de la potencia detectada con la antena fija en la posición del tránsito. Este método se conoce en astronomía como *drift scan*.

³Disponible en (24/06/2024): <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/128984-astro-pack-maatv2>

Parámetro	Descripción
P_1	Offset del encoder de AZ.
P_2	Error de colimación.
P_3	Inclinación del eje de EL.
P_4	Inclinación del eje de AZ N-S.
P_5	Inclinación del eje de AZ E-W.
P_6	Error de coordenadas.
P_7	Offset del encoder de EL.
P_8	Deformación gravitatoria.
P_9	Deformación gravitatoria.

Tabla 6.1: Caption

6.5. Resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos, tanto para el modelo de apuntamiento como de los tránsitos detectados.

6.5.1. Modelo de apuntamiento

Las Figuras 6.4 y 6.5 muestran las correcciones en azimut y elevación ($\Delta A = A_{PM} - A$, $\Delta E = E_{PM} - E$), respectivamente, arrojadas por el modelo, en todo el rango de movimiento de la antena ($[-50;+60.2]^\circ$ en azimut, $[14.0;65.0]^\circ$ en elevación).

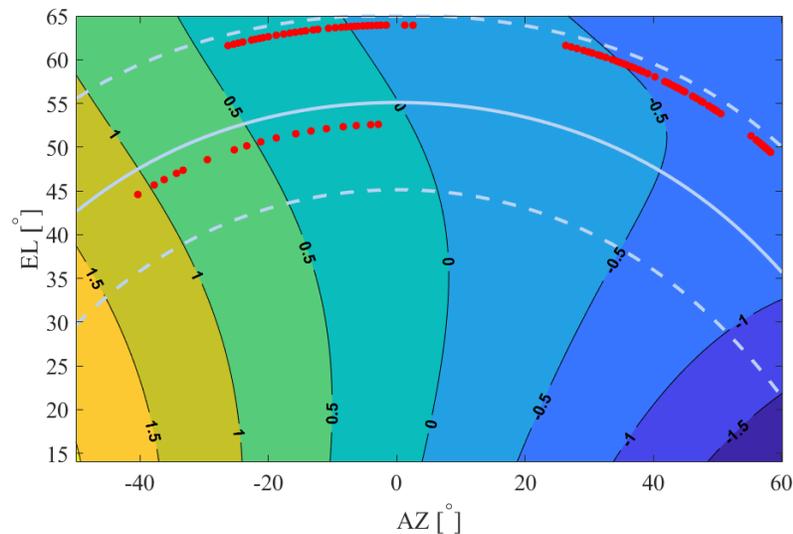


Figura 6.4: Corrección (en $^\circ$) en azimut $\Delta A = A_{PM} - A$ aplicada por el modelo en todo el rango de movimiento de la antena. Los círculos rojos indican los puntos utilizados para construir el PM. Las curvas celestes indican el plano ecuatorial (continua) más o menos $\pm 10^\circ$ (punteadas).

Las Figuras 6.6 y 6.7 muestran azimut y elevación arrojados por el modelo, en función del correspondiente dato A_{ACU} , E_{ACU} . Los datos de elevación muestran un comportamiento fluctuante en torno de la recta $y(E)=E$, que se refleja más claramente en la Figura 6.8 que muestra los

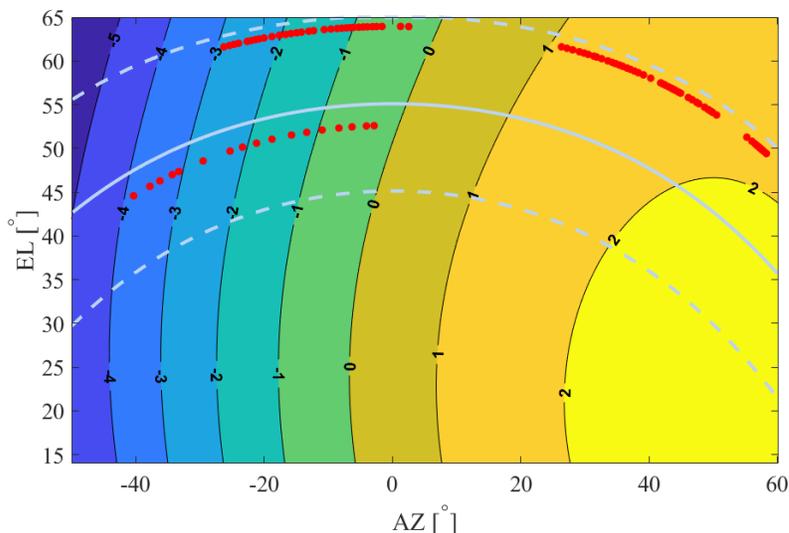


Figura 6.5: Corrección (en $^{\circ}$) en elevación $\Delta E = E_{PM} - E$ aplicada por el modelo en todo el rango de movimiento de la antena. Los círculos rojos indican los puntos utilizados para construir el PM. Las curvas celestes indican el plano ecuatorial (continua) $\pm 10^{\circ}$ (punteadas).

errores asociados a cada punto (Ecuación 6.3) en función de la elevación. Como muestra este gráfico, las oscilaciones son de $\sim \pm 0,1^{\circ}$ en torno a $\sim 0,2^{\circ}$.

Los valores obtenidos de los parámetros $P_1 - P_9$ se muestran en la Tabla 6.2, y los errores RMS y medio absoluto (MAE) en cada coordenada se indican en la Tabla 6.3. Ambas tablas contienen los resultados correspondientes a toda la muestra disponible de puntos (97), y a una submuestra generada a partir de una eliminación de outliers iterativa, en donde en cada iteración es eliminado el punto con mayor error RMS, hasta llegar a un RMS total seteable (en este caso la apreciación del ACU, es decir, $0,1^{\circ}$) o a un mínimo de puntos, también seteable. Como muestran las tablas, con 54 puntos (108 ecuaciones) se logra un RMS total de $0,1^{\circ}$. Para esta submuestra, los errores RMS individuales de cada punto no tienen ninguna correlación con la elevación, como evidencia la Figura 6.9.

El modelo reportado aquí evidentemente adolece de un rango muy acotado tanto en azimut como en elevación. Ampliar este rango con mediciones del Sol es posible aunque costoso en términos de tiempo. Debido a las limitaciones en sensibilidad que se muestran más adelante, no es posible incluir fuentes brillantes en radio otras que la Luna, que ciertamente aportaría una cobertura adicional. Otra posibilidad es incluir satélites geoestacionarios, que típicamente se encuentran en torno a $\pm 10^{\circ}$ del plano ecuatorial. Esta banda se muestra en las Figuras 6.5 y 6.4, que ilustran la porción de región (Az,El) cubierta por satélites geoestacionarios.

6.5.2. Drift scans

Utilizando el modelo de apuntamiento obtenido con todos los puntos disponibles, se realizó un drift scan del Sol el 27 de marzo de 2024. Para ello, se generaron las efemérides del Sol con la herramienta web *Horizons* del Jet Propulsion Laboratory (JPL) de NASA para ese día⁴. Se eligió el punto más cercano a la culminación ($Az=0$) porque como muestran las Figuras 6.4 y 6.5 es un punto cercano a los datos con los que se construyó el modelo de apuntamiento.

⁴Disponible (10/4/2024) <https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons/app.html#/>

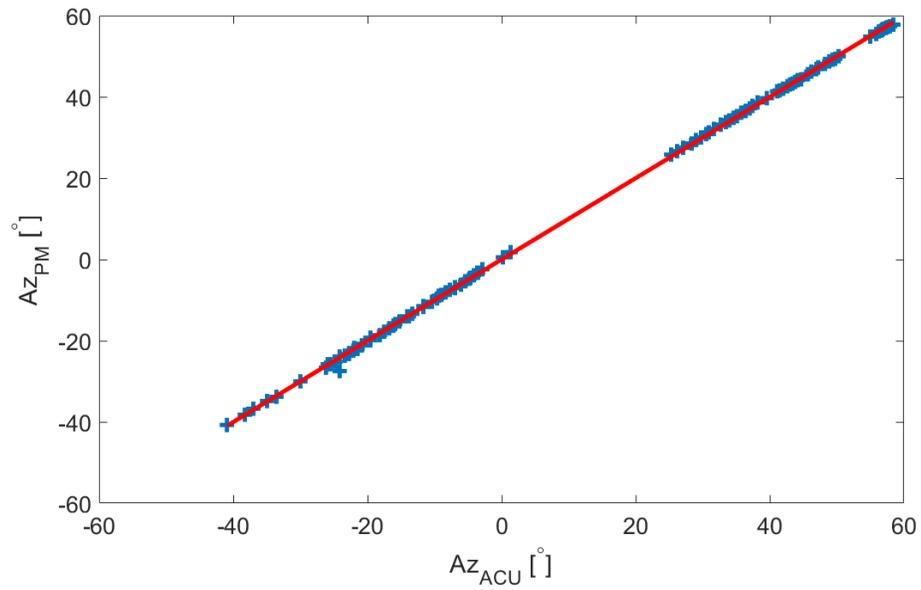


Figura 6.6: Gráfico de "modelo vs. dato", en azimut. La curva roja superpuesta es $y(Az_{ACU})=Az_{ACU}$.

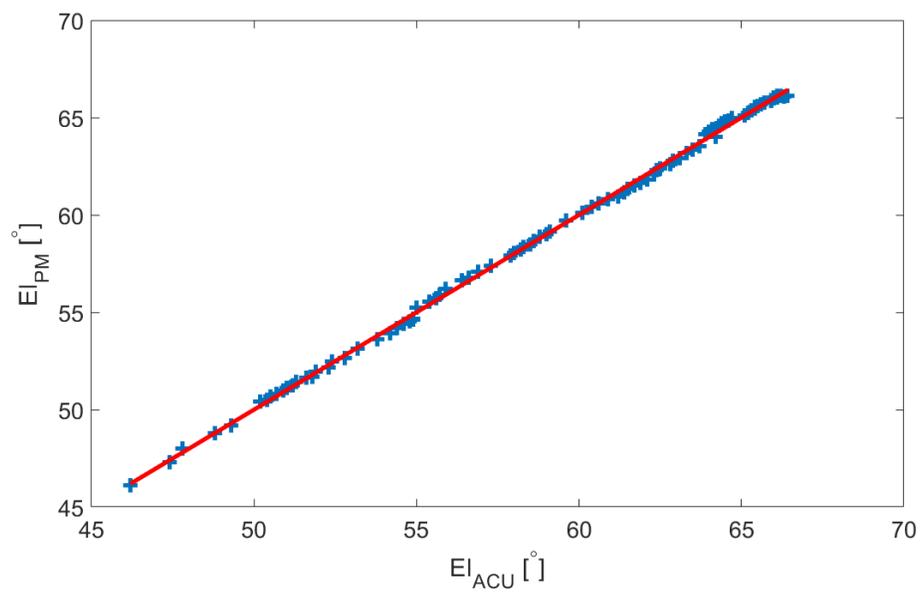


Figura 6.7: Gráfico de "modelo vs. dato", en elevación. La curva roja superpuesta es $y(El_{ACU})=El_{ACU}$.

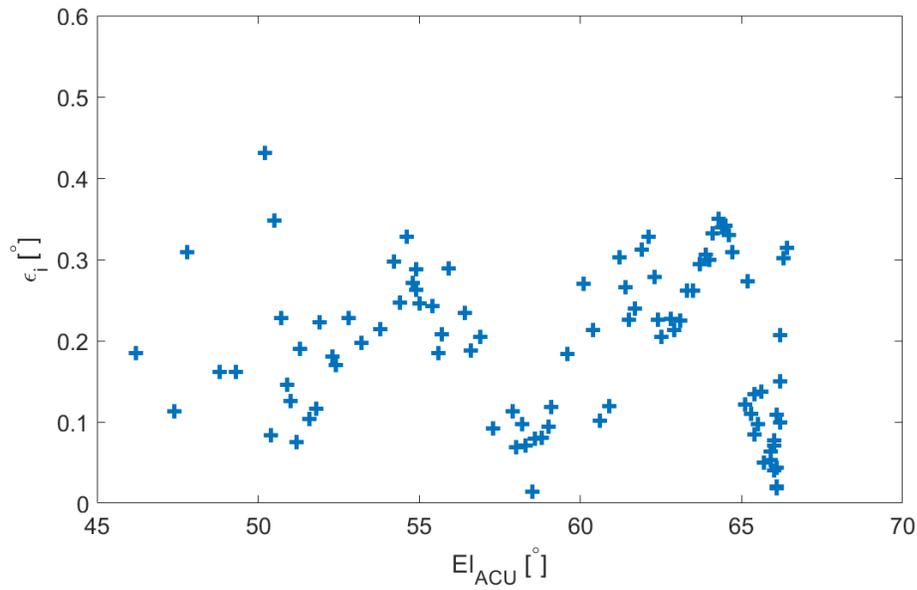


Figura 6.8: Error asociado a cada punto (en $^\circ$) en función de la elevación.

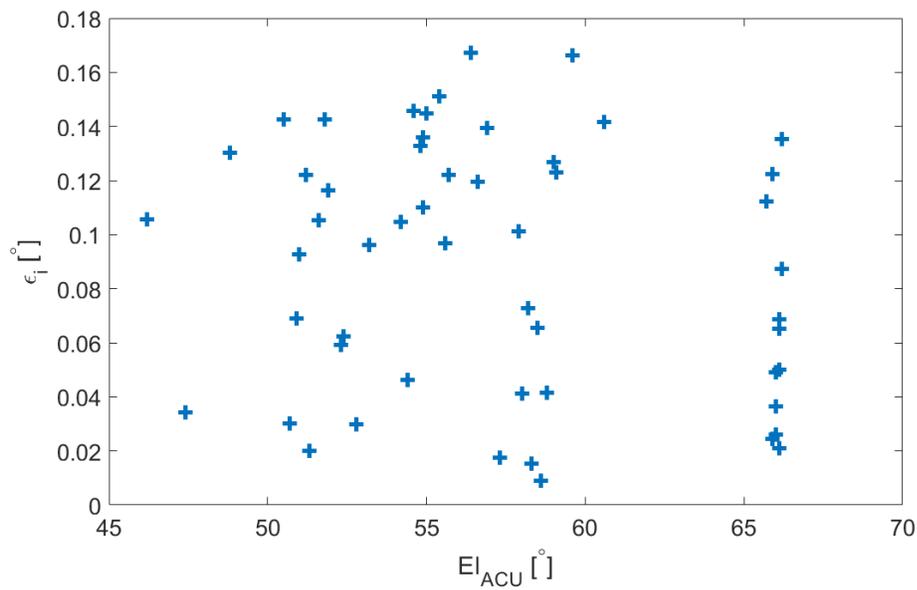


Figura 6.9: Errores asociado a cada punto de la submuestra utilizada para el modelo de apuntamiento, generada mediante el proceso iterativo descrito en el texto.

6.5. Resultados

Parámetro	Toda la muestra	Submuestra
# puntos	97	54
P_1	-2.7719	-10.4007
P_2	5.4132	19.1499
P_3	-5.6083	-17.3853
P_4	0.5389	0.7483
P_5	1.5878	1.3549
P_6	-1.0655	-0.5874
P_7	-22.4354	-32.7662
P_8	11.4606	17.6777
P_9	21.0976	29.3245

Tabla 6.2: Valores (en grados) de los parámetros obtenidos del modelo de apuntamiento. La submuestra corresponde a la utilizada luego del proceso iterativo descrito en el texto ($RMS \leq \theta_{HPBM}/10$).

Parámetro	Toda la muestra	Submuestra
# puntos	97	54
RMS [°]	0.27	0.10
MAE, AZ [°]	0.26	0.10
MAE, EL [°]	0.13	0.06

Tabla 6.3: Métricas de desempeño del modelo de apuntamiento. La submuestra corresponde a la utilizada luego del proceso iterativo descrito en el texto ($RMS \leq \theta_{HPBM}/10$).

Las efemérides con pasos de 1m generadas con Horizons se muestran en la Tabla 6.4, donde se indica en negrita la posición elegida para apuntar la antena.

Las coordenadas de apuntamiento que devolvió el modelo construido con la submuestra, fueron $A_{ap} = 359,35^\circ$ $E_{ap} = 54,417^\circ$, es decir que a la ACU se ingresó la posición (359.4;54.4). La Figura 6.10 muestra los datos crudos del tránsito, ue genera un valle debido a que, como se indicó en el Capítulo 5, el radiómetro tiene una respuesta de pendiente negativa (ver Figura 5.6). Estos datos fueron filtrados con un suavizado de mediana móvil (5s) y restada la línea base, obteniéndose la Figura 6.11, que muestra los datos reducidos y superpuesta una curva de ajuste gaussiano de la forma:

Fecha, hora [UT]	Az [°]	El [°]	$(dAz/dt) \cdot \cos E$ ["/min]	$d(El)/dt$ ["/min]
2024-Mar-27 15:45	2.0039	52.2649	-898.67	24.89
2024-Mar-27 15:46	1.5959	52.2711	-898.80	19.62
2024-Mar-27 15:47	1.1879	52.2758	-898.90	14.36
2024-Mar-27 15:48	0.7798	52.2791	-898.97	9.09
2024-Mar-27 15:49	0.3716	52.2809	-899.01	3.82
2024-Mar-27 15:50	359.9634	52.2812	-899.02	-1.45
2024-Mar-27 15:51	359.5552	52.2801	-898.99	-6.72
2024-Mar-27 15:52	359.1471	52.2775	-898.94	-11.99
2024-Mar-27 15:53	358.7390	52.2734	-898.85	-17.25

Tabla 6.4: Efemérides del Sol generadas por la aplicación *Horizons* de JPL. En negrita se indica el tiempo y posición elegidos.

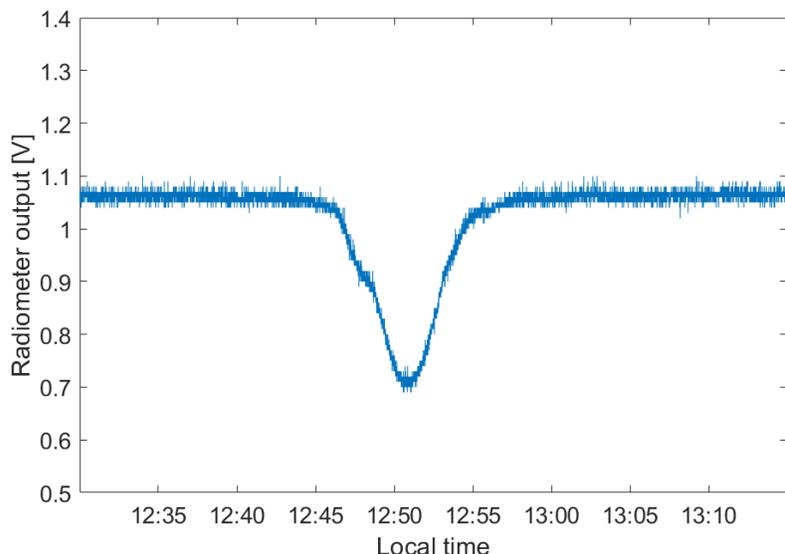


Figura 6.10: Datos crudos del radiómetro generados por el tránsito solar descrito en el texto.

Parámetro	Valor	Δ
A [mV]	344.1	0.6
t_0 [HLU]	12:50:49.4	0.2
σ [s]	169.8	0.3

Tabla 6.5: Parámetros obtenidos del ajuste gaussiano a los datos reducidos del tránsito solar. Las incertidumbres Δ asociadas surgen del intervalo de confianza del 95% del ajuste (HLU indica hora local uruguaya).

$$V(t) = A \cdot \exp\left[-\left(\frac{t-t_0}{\sigma}\right)^2\right] \quad (6.6)$$

Los resultados del ajuste se muestran en la Tabla 6.5. Es preciso recordar que la tensión de salida del radiómetro es proporcional a la potencia *en dBm*, es decir que para obtener el ancho de -3.01dB necesitamos hallar la tensión que corresponde a la mitad del pico de potencia ($A=344.1mV$). Asumiendo el valor nominal de 25mV/dB del radiómetro, encontramos que la mitad de la potencia del pico corresponde a:

$$V_{1/2} = A - 25[mv/dB] \cdot 3,01dB = 268,9mV \quad (6.7)$$

Igualando la Ec. 6.6 a este valor podemos despejar el ancho 3dB de la potencia, $FWHM_p$:

$$FWHM_p = 2 \cdot \sigma \sqrt{\ln A/268,9} = 168,6s \quad (6.8)$$

El lunes 8 de abril, día del eclipse total observado en América del Norte, a los efectos de intentar detectar los sucesivos tránsitos de la Luna, primero, y del Sol después, y dado que la posición de estos astros en el momento del eclipse implicaba una extrapolación del modelo de apuntamiento bastante más allá de la región del cielo para la que se disponían datos, se optó por buscarlos a partir de las coordenadas de apuntamiento nominales arrojadas por el modelo, ajustando luego manualmente hasta detectar un pico en la potencia del radiómetro. Se encontró

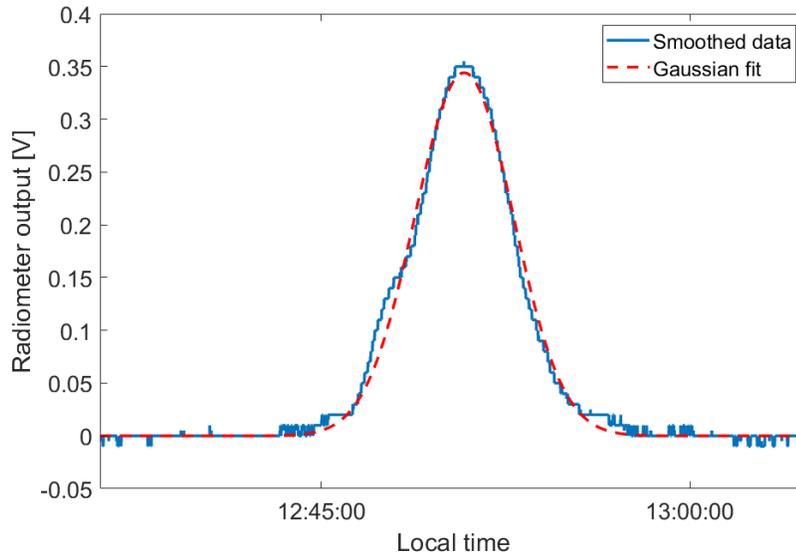


Figura 6.11: Datos radiométricos reducidos y curva de ajuste gaussiano (roja) superpuesta.

de esta manera que el modelo difería en más de un grado de la posición real, evidenciando así la necesidad de cubrir la mayor parte del cielo posible para construir un "buen" modelo de apuntamiento, que minimice estas extrapolaciones.

La posición de ambos astros en el cielo a las 14:25 hora local uruguaya (HLU) de esa fecha se muestran en la Figura 6.12, generada con el software *Stellarium*. La separación angular entre ambos es de $\sim 1.3^\circ$. Los sucesivos tránsitos detectados se muestran en la Figura 6.13. El salto que se observa sobre las 14:30 obedece al movimiento de la antena hacia la posición del Sol. Los picos de los ajustes gaussianos fueron de $0.0571\text{V} \pm 0.3\text{mV}$ y $0.361 \pm 1.0\text{mV}$, para la Luna y el Sol, respectivamente.

6.6. Discusión

6.6.1. Óptica de la antena

El $FWHM_p$ del tránsito solar (168.6s) es fácilmente convertible en grados, a partir del desplazamiento angular del astro. Podemos obtener una aproximación apenas más precisa al valor medio de $0.2500^\circ/\text{min}$ a partir de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los desplazamientos angulares en cada coordenada que nos brindan las efemérides de JPL (cuarta y quinta columna de la Tabla 6.4). La diferencia entre este valor ($0.2497^\circ/\text{min}$) y el valor medio es de apenas un $\sim 0.1\%$. De todos modos consideramos el valor dado por las efemérides, ya que está disponible, y por cuanto las incertidumbres en los parámetros de ajuste son también de este orden. De este modo, el $FWHM$ obtenido se traduce en 42.1 ± 0.1 arcmin.

Ahora bien, en términos generales, la potencia detectada en un instante determinado de tiempo, es proporcional a la integral (doble) en todo el cielo del producto del patrón de radiación de la antena apuntando en una dirección (θ_0, ϕ_0) , $B(\theta - \theta_0, \phi - \phi_0)$, con la intensidad de brillo de la fuente $I(\theta, \phi)$ (ver por ej. [Marr et al., 2015], p. 144):

Capítulo 6. Modelo de apuntamiento y drift-scans con antena 106

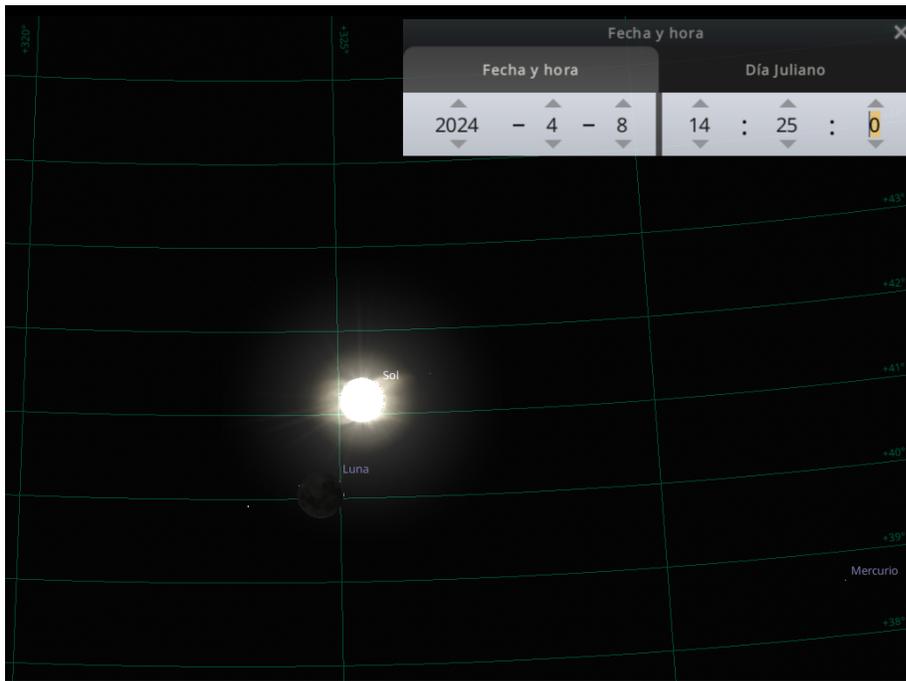


Figura 6.12: Posiciones del Sol y la Luna a las 14:25 (hora local uruguaya) del 8/4/2024, para las coordenadas de la Estación Terrena de Manga (LAT -34.8039N; LON -55.1406E).

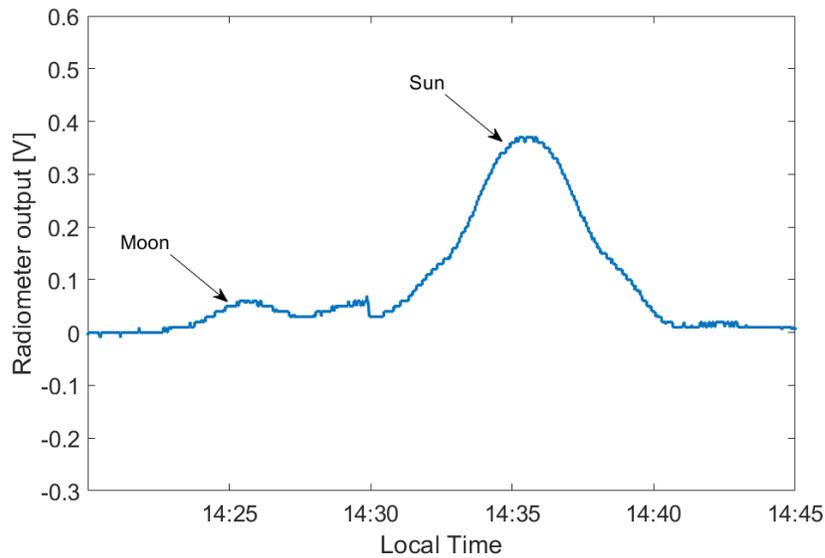


Figura 6.13: Tránsitos sucesivos de la Luna y el Sol, detectados el 8/4/2024 alrededor de las 14:30 hora local uruguay.

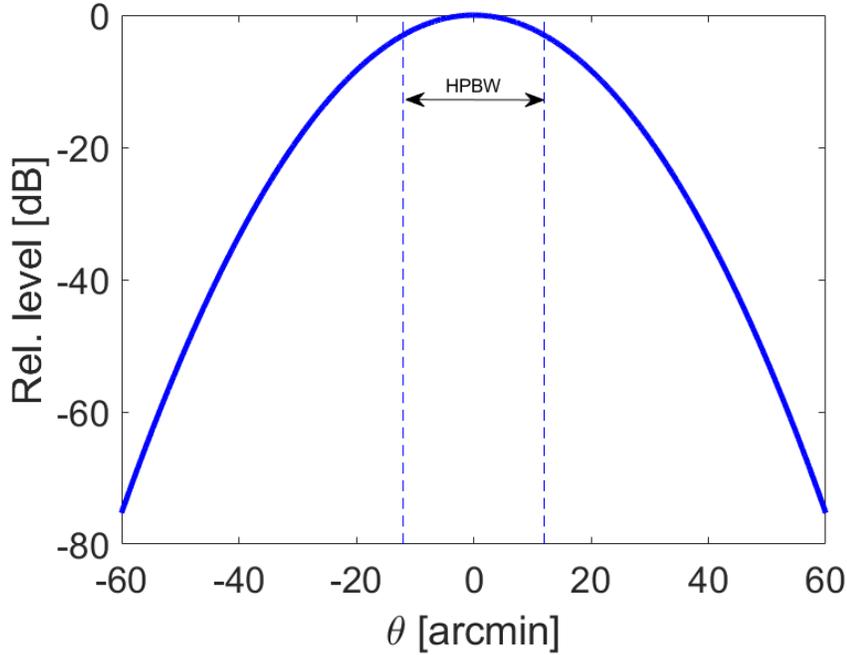


Figura 6.14: Patrón de radiación gaussiano asumido para la antena 106.

$$P \propto \int_{\text{cielo}} I_s(\theta, \phi) \cdot B(\theta - \theta_0, \phi - \phi_0) \sin(\theta) d\theta d\phi \quad (6.9)$$

Para simplificar el análisis, asumimos que el patrón de radiación de la antena es gaussiano, estando su dependencia de θ dada por la Ec. 6.10, lo cual corresponde a una apertura circular iluminada por un patrón gaussiano no truncado (ver por ejemplo [Marr et al., 2015], [Kildal, 2000]).

$$B(\theta) = \exp\left[-4\ln(2)\left(\frac{\theta}{HPBW}\right)^2\right] \quad (6.10)$$

De la Tabla 3.5, cuyos datos provienen de la hoja de datos del fabricante, sabemos que el HPBW de la antena a 4GHz es de 1.2° . Una extrapolación simplificada de este valor a la frecuencia central del LNB en banda Ku (11.55GHz), arroja una HPBW de 24° . El patrón de radiación estimado de esta forma se muestra en la Figura 6.14.

En cuanto a la fuente, podemos asumir (ver por ejemplo [Nicholson and Parker, 1973], [Das et al., 2000]) un disco solar en radio de diámetro ($2R_{r,\odot}$) igual a un factor k por el tamaño del disco óptico ($2R_{v,\odot}=32.04'$ en esa fecha):

$$S(\theta) = \begin{cases} 1, & |\theta - \theta_0| \leq R_{r,\odot} = k \cdot R_{v,\odot} \\ 0, & |\theta - \theta_0| > R_{r,\odot} = k \cdot R_{v,\odot} \end{cases} \quad (6.11)$$

La señal de potencia resultante del tránsito, será entonces:

$$P(t) \propto 10 \cdot \log_{10} \left[\int_{t-\delta t}^{t+\delta t} S(\theta - \theta_0(t)) \cdot B(\theta) d\theta \right] \quad (6.12)$$

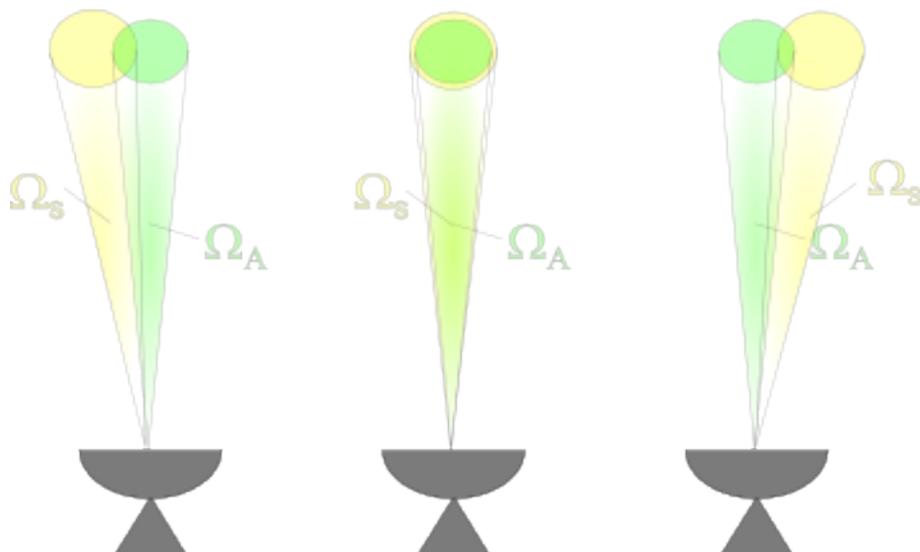


Figura 6.15: Esquema del tránsito solar que ilustra el ensanchamiento detectado. Se indican los ángulos sólidos de la antena (subíndice A) y fuente (S).

donde el ángulo $\theta_0(t)$ es simplemente el ángulo que forman el haz de la antena y la fuente, que evidentemente es función del tiempo. La aplicación del logaritmo es debido a que nuestra señal es proporcional a la potencia *en dB*. Una caricatura del tránsito se muestra en la Figura 6.15 para ilustrar lo anterior. Esta figura es similar a la Figura 5 de [Southworth, 1945]⁵.

A partir de la Ec. 6.12, es posible ajustar el disco de la fuente a través del parámetro k , de forma tal que la señal obtenida mediante este modelo, reproduzca la señal detectada⁶. En particular, se ajustó manualmente k hasta obtener un FWHM igual a la detectada (42.1'). La Figura 6.16 muestra la señal reproducida $P(\theta)$ a partir del patrón de la antena $B(\theta)$ y del perfil de la fuente $S(\theta)$. El valor de k obtenido es de $k = 1.30$, lo cual significa que el disco solar en radio obtenido es de $1,30 \cdot 32' = 42'$.

Las observaciones interferométricas reportadas en [Nicholson and Parker, 1973] y en otras referencias contenidas en dicho trabajo, arrojan valores significativamente menores de k , entre 1.03 y 1.07, es decir que dichas mediciones arrojaron un disco solar en radio apenas un 3-7% mayor que el óptico. Estas observaciones fueron realizadas con un interferómetro de dos antenas, y los patrones de radiación de cada antena fueron *medidos*, con fuentes conocidas a nivel de suelo.

Por otra parte, en el más reciente trabajo de [Das et al., 2000], se reporta un monitoreo del disco solar en radio a 3cm (10 GHz) y 10.7cm (2.8 GHz) con un array lineal, realizado diariamente entre 1975–1976 y 1985–1986 (mínimo solar) y 1979–1980 y 1991–1992 (máximo solar). Los valores de k obtenidos en este trabajo para medias mensuales del máximo solar de 1979-1980 se encuentran entre ~ 1.20 - 1.30 y ~ 1.05 - 1.20 para 10.7 y 3cm, respectivamente. Este trabajo evidencia la variabilidad en el tamaño del disco solar en radio debido al ciclo solar, pero también debido a eventos transitorios como erupciones, que se manifiestan más en banda S (10.7cm) que en band X o Ku.

⁵Se trata de un trabajo pionero en la historia de la radioastronomía, cuyos resultados fueron obtenidos por George Clark Southworth (1890–1972), ingeniero de Bell Labs al igual que Jansky, durante la Segunda Guerra Mundial pero reportados una vez finalizada la misma, por razones de seguridad. El autor reporta tránsitos en tres longitudes de onda entre 1 y 10cm (30-3 GHz).

⁶Esto es equivalente a la deconvolución del patrón de radiación de la antena y la señal detectada

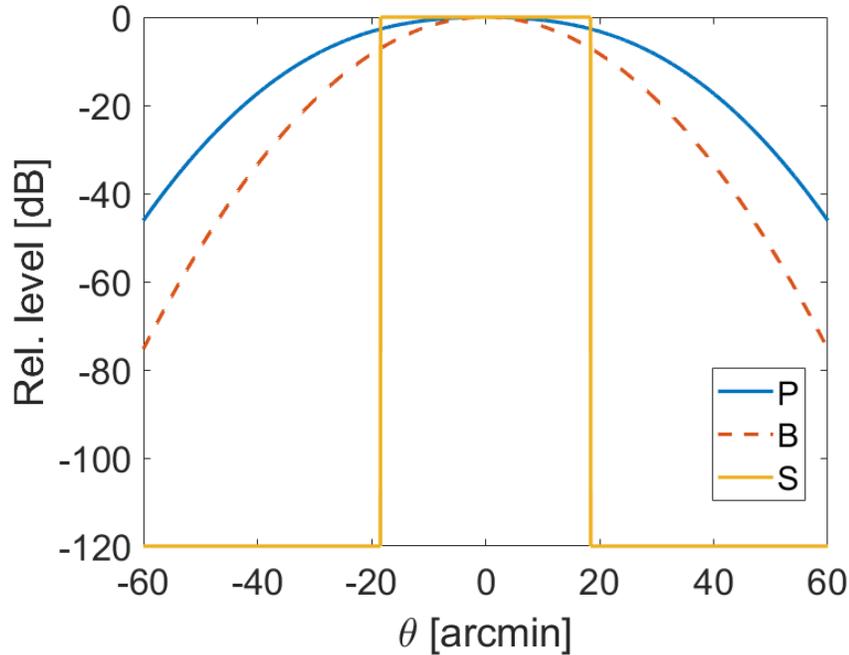


Figura 6.16: Modelos de señal de potencia detectada (azul) a partir del patrón de radiación de la antena (roja, punteada) y del perfil asumido para la fuente (naranja).

Una mejora a la metodología presentada aquí para un posible monitoreo del disco solar en banda C y Ku (posible con la antena 106), sería utilizar un patrón de radiación de la antena obtenido empíricamente, como lo realizado en las citas mencionadas, en lugar de un modelo asumido a priori.

6.6.2. Consideraciones sobre flujo y respuesta del radiómetro

A partir de los tránsitos consecutivos de la Luna y el Sol del 8/4/24, podemos inferir lo siguiente. El pico del pulso lunar es de 53mV, mientras que el del Sol fue de 361mV. El nivel de ruido ($1-\sigma$) fue de 4mV, con lo cual la diferencia entre ambos es de 308 ± 8 mV. Si asumimos la pendiente nominal del detector de potencia (-25mV/dB), esta diferencia corresponde a $12.3\text{dB} \pm 0.3\text{dB}$.

De la ecuación de Rayleigh-Jeans surge que el cociente entre el flujo S_1 de un cuerpo negro a T_1 sobre el flujo S_2 de otro cuerpo negro a T_2 es proporcional al cociente de las temperaturas:

$$10\log\left(\frac{S_1}{S_2}\right) = 10\log\left(\frac{T_1}{T_2}\right) \quad (6.13)$$

La temperatura de brillo lunar tiene un comportamiento periódico de la forma:

$$T = T_0 + T_1 \cos(\omega t + \phi) \quad (6.14)$$

El período coincide con el período lunar, y el máximo de la curva ocurre en la fase decreciente. Valores típicos de T_0 obtenidos con mediciones a 2-3 cm se ubican entre 206 y 216 K, y para T_1 se han obtenido valores entre 12 y 20 K (ver Tabla 1 en [Troitskii and Tikhonova, 1970]).

Capítulo 6. Modelo de apuntamiento y drift-scans con antena 106

Si asumimos una temperatura efectiva del Sol de 5780K, y una temperatura de brillo de la Luna de 210 K obtenemos una diferencia de flujos de 14.4dB, unos 2 dB por encima del valor obtenido a partir del valor nominal de la pendiente del detector (25 mV/dB).

Existen varias fuentes posibles de incertidumbre que pueden explicar esta discrepancia. La más relevante sea probablemente debida al apuntamiento. Un error de apuntamiento de algo menos que el HPBW/2, de digamos 10', ocasiona una pérdida de señal de ~2 dB, y dada la calidad del modelo utilizado y la apreciación del ACU (0.1°) ello es perfectamente posible. Por otro lado, existe cierta incertidumbre también en la pendiente de la respuesta del radiómetro, de quizá algunas décimas de mV, que se podría salvar inyectando al receptor una fuente de ruido de potencia variable y registrando la respuesta del radiómetro. Si bien en esta medición en particular no es de suponer variaciones significativas en la ganancia del sistema, por cuanto ambas mediciones están separadas pocos minutos, podría incluirse un switcheo de Dicke con un diodo de ruido, que minimizaría los efectos de estas fluctuaciones.

Finalmente, cabe señalar que la SNR de la detección lunar es de $(52.6-13)/25=1.6\text{dB}$, con lo cual está prácticamente en el umbral de la sensibilidad del sistema. Esto implica que con *este* setup y metodología, resulta difícil detectar alguna fuente brillante en radio (tipo OriA, VirA, o algún destello de máser de metanol a 12GHz), que se encuentran más de 15dB por debajo del flujo lunar (ver Fig 2.3). Parece claro que es necesaria una etapa adicional de amplificación de 20-30 dB, aunque ello incrementa también el ruido del sistema. Asimismo, valdría la pena realizar mediciones en banda C para determinar la sensibilidad del sistema en esta porción del espectro, donde varias fuentes son más brillantes que en banda Ku. Finalmente, y mientras no se disponga de un sistema de tracking celeste, es posible integrar (sumar) varios tránsitos de una misma fuente, mejorando así la SNR de la medición.

6.7. Conclusiones

He presentado en este capítulo los principales resultados de caracterización de la antena 106 de la Estación de Manga, utilizando el sencillo radiómetro desarrollado. En particular se obtuvo un modelo de apuntamiento, que si bien es preciso ampliarlo incorporando puntos que cubran todo el rango de movimiento de la antena (con el Sol, la Luna y satélites geoestacionarios), se dejó sentada la metodología y el conjunto de rutinas de software necesarias para hacerlo.

A partir de un tránsito solar se modeló el perfil de brillo del Sol a 11.55GHz, encontrándose un diámetro algo superior a lo reportado en otros trabajos ([Nicholson and Parker, 1973] y referencias contenidas), lo cual probablemente se deba a discrepancias entre el patrón de radiación real de la antena y el modelo asumido.

Las detecciones de tránsitos sucesivos de la Luna y el Sol permiten aseverar que el setup de hardware utilizado no es lo suficientemente sensible como para detectar aun las fuentes más brillantes en banda Ku, exceptuando estos dos astros.

Sin embargo, este setup permitirá ser utilizado como instrumento para la formación de grado en radioastronomía fundamental, a través por ejemplo de la realización de experiencias como las reportadas aquí. A su vez, la experiencia adquirida mediante estas actividades permitirán abordar la caracterización de la antena 3A, y su posterior uso como instrumento científico.

Capítulo 7

Estimación de edades de núcleos moleculares calientes a partir de observaciones de un solo plato

Lo descrito en el presente Capítulo constituyó la primera actividad de la presente tesis y significó en primer lugar adquirir habilidades en la reducción y análisis de datos radioastronómicos, utilizando software profesional (GBTIDL, desarrollado por el Green Bank Observatory y utilizado para la reducción de datos adquiridos con el GBT) y scripts propios desarrollados a medida para el postprocesamiento.

Los datos habían sido previamente adquiridos en 2011 por Vicente Hernández (IRyA), Alvaro Sanchez-Monge (Universidad de Barcelona) y Stan Kurtz (IRyA), pero nunca reducidos ni analizados hasta que se abordó dicho trabajo en el marco de esta tesis.

El análisis de los resultados y estudio que se presenta aquí fue elaborado junto a Stan Kurtz y Sergei Kalenskii, y se incluyen en un artículo enviado a *Publications of the Astronomical Society of Japan* (PASJ), actualmente en revisión. Por esta razón, en este capítulo se habla en primera persona del plural.

Se trata de un relevamiento de once fuentes que albergan los denominados núcleos moleculares calientes (en adelante HMC, por su sigla en inglés), verdaderas cunas de estrellas masivas, en búsqueda de líneas de emisión de cianopolinas. Esta familia de moléculas (de la forma HC_{2n+1}N , $n=1,2,\dots$) tienen abundancias relativas que son fuertemente dependientes de las condiciones físicas en que se forman, que van cambiando a lo largo de la evolución temprana de los objetos protoestelares masivos (en adelante, HMPO por su sigla en inglés).

Por ello, las cianopolinas, y como se verá otras moléculas también, constituyen verdaderos "relojes químicos" cuya detección permite estimar la edad del HMPO en que son detectadas, utilizando adicionalmente modelos y simulaciones numéricas de la evolución química de estas especies en variadas condiciones de densidad de gas y temperatura.

Un marco teórico general de la evolución temprana de estrellas masivas, así como de la química que tiene lugar a lo largo de dicha evolución, se brinda en los apartados 7.1, 7.2 y 7.3. Las principales características conocidas de cada una de las fuentes observadas son descritas en el apartado 7.4. El instrumental utilizado y demás detalles de las observaciones se describen en el apartado 7.5. Las detecciones realizadas y su análisis están contenidos en el apartado 7.6. El apartado 7.7 contiene una discusión de estos resultados, y las conclusiones de este trabajo se presentan en 7.8.

7.1. Introducción

Los HMC son estructuras compactas (<0.1 pc), densas ($\sim 10^6 \text{ cm}^{-3}$) y calientes (>100 K), en las que se forman estrellas masivas, a partir de un HMPO. Desde el punto de vista evolutivo, los HMC constituyen la etapa posterior a la formación de núcleos masivos fríos, y anterior a la formación de una región HII ultracompacta.

Las estrellas masivas ($> 8M_{\odot}$) cumplen un rol fundamental en la evolución del ambiente galáctico, al reciclar y a la vez enriquecer el material interestelar.

El límite de $8M_{\odot}$ se debe a que estrellas más masivas que este umbral no tienen una fase pre-secuencia principal ([Stahler and Palla, 2004]).

Su evolución es un área de investigación activa ya que su formación y desarrollo aún no son del todo comprendidos. Esto se debe fundamentalmente a que su número es relativamente bajo y sus vidas cortas. A esto se añade que en sus estadios evolutivos iniciales se encuentran aun embebidas en la nube molecular de la que nacieron, lo que causa una extinción elevada en el visible y el UV, dificultando su observación en estas longitudes de onda, en etapas tempranas de su desarrollo ([Rathborne et al., 2006], [Morisset et al., 2002]).

Dos factores adicionales dificultan su observación. Por un lado, se encuentran típicamente a distancias del orden de kiloparsecs (ver por ejemplo Tabla 7.3), lo cual es más de un orden de magnitud mayor que la menor distancia a regiones de formación de estrellas poco masivas. Por otro lado, las estrellas masivas frecuentemente se forman en cúmulos, y resulta un desafío alcanzar una resolución que permita identificar objetos individuales ([De Buizer et al., 2005]).

Por las consideraciones hasta aquí expuestas es que las observaciones centimétricas del continuo de radio y de líneas moleculares han sido herramientas fundamentales en el estudio de la formación de estrellas masivas. Los radio interferómetros han sido utilizados para alcanzar resoluciones por debajo del segundo de arco, tanto para el continuo de radio proveniente de regiones fotoionizadas circundantes a las estrellas masivas jóvenes (emisión libre-libre) como para líneas espectrales ([De Buizer et al., 2005]).

Observaciones de un solo plato complementan lo anterior y han sido realizadas para relevamientos que abarcan varias fuentes y bandas, revelando así una rica diversidad química en estas regiones.

En el IR sucede que los telescopios espaciales (MSX, Spitzer) no logran las resoluciones necesarias para el estudio de HMCs individuales que contienen protoestrellas ($\sim 5''$ a $8 \mu\text{m}$, $\sim 13''$ a $21 \mu\text{m}$ en el caso de MSX, $\sim 2''$ a $8 \mu\text{m}$, $\sim 6''$ a $24 \mu\text{m}$ en el caso de Spitzer). Esto sí es posible con observaciones desde la Tierra en el IR medio ($3\text{-}5 \mu\text{m}$), con telescopios de 8-10m ([De Buizer et al., 2005]).

En los HMC se produce una gran variedad de reacciones químicas, promovidas por la radiación del HMPO al evaporar moléculas presentes en granos del polvo circundante. Estas reacciones dan lugar a nuevas moléculas, cuyas abundancias relativas pueden ser utilizadas para constreñir edades de HMC, a través de modelos químicos existentes. Una familia de estas moléculas, verdaderos "relojes químicos", son las cianopolinas, así como también el acetonitrilo (CH_3CN) y algunas moléculas basadas en azufre (SO_2 , OCS).

7.2. Evolución

El proceso de formación estelar puede resumirse del siguiente modo. Una nube molecular gigante (GMC, por su sigla en inglés) se fragmenta en "grumos" más compactos ($0.5\text{-}1$ pc), masivos ($100\text{-}10^3 M_{\odot}$) y densos ($10^4 - 10^6 \text{ cm}^{-3}$). Dentro de estos grumos, el gas condensa en estructuras más compactas aún, llamadas núcleos (en inglés, *cores*). Es el colapso gravitatorio dentro de estos núcleos el que da lugar a la formación de la protoestrella y disco circundante a partir de la acreción de material. Cada núcleo da lugar a la formación de una estrella ([Rathborne et al., 2010]).

7.2. Evolución

Durante la formación del sistema protoestrella-disco también se forman chorros (en inglés *jets*) y flujos bipolares de material. Los flujos bipolares son gas acelerado en dos direcciones opuestas durante el proceso de formación de estrellas de prácticamente cualquier masa, tanto en glóbulos aislados como en regiones de formación de cúmulos. Por ello es que se cree que forman parte indisoluble del proceso de formación estelar en general, al constituir un mecanismo de pérdida de momento angular fruto de la formación de un objeto compacto. Las moléculas trazadoras de chorros son, además de CO, H₂O, H₂, y también ciertas moléculas complejas (de más de seis átomos), muy particularmente metanol (CH₃OH), cuya abundancia es aumentada varios órdenes de magnitud en estos flujos de material ([Tafalla and Bachiller, 2011]).

El proceso de formación de estrellas de baja masa está mejor caracterizado y estudiado que el de estrellas masivas. Esto se debe a que los llamados glóbulos de Bok¹, que son las "cunas" de estrellas poco masivas, se encuentran a menores distancias y no están tan embebidas dentro de la nube molecular. Además, la formación estelar de baja masa es un proceso más lento y menos complejo. A partir del conteo de estrellas en el visible e IR, se ha podido determinar masas (1-100 M_⊙), tamaños (0.1-2pc), y revelado estructuras internas simples de estos glóbulos. Dentro de ellos se encuentran los núcleos pre-protoestelares, que son regiones frías (~ 10K), compactas (~ 0,05pc), de baja masa (0,5 – 5M_⊙) y alta densidad (10⁵ – 10⁶cm⁻³). Una vez que estos núcleos comienzan a colapsar gravitacionalmente y evolucionar hacia la secuencia principal, emiten fuertemente en el IR y se producen flujos moleculares, chorros y objetos Herbig-Haro ([Shu et al., 1987]).

Por otra parte, como ya se indicó, el proceso de formación de estrellas masivas no está tan bien caracterizado, aunque los HMC constituyen su fase mejor estudiada. Por ejemplo, se sabe que es en sus etapas más tardías que los HMC presentan flujos moleculares y emisión máser, ambos fenómenos característicos de un disco de acreción. A su vez, es también en este estadio que se forma la región ultracompacta HII (UC HII, por su sigla en inglés) en torno de la protoestrella.

Las UC HII son nebulosas compactas (diámetros <~ 0,1 pc, densidades > 10⁴cm⁻³) de hidrógeno fotoionizado por estrellas jóvenes de tipo O y B, que se encuentran embebidas en nubes moleculares. El polvo de la nube molecular que rodea la estrella y su región UC HII absorbe la práctica totalidad de la radiación estelar, por lo que no pueden distinguirse en el visible. El polvo re-emite en el infrarrojo lejano (FIR, 0.1mm-30μm) la radiación absorbida, produciendo focos brillantes en esta porción del espectro. Estas fuentes puntuales han sido identificadas en relevamientos del IRAS (*Infrared Astronomical Satellite*) y recogidas en el catálogo *IRAS Point Source Catalogue* (PSC, [Wood and Churchwell, 1989]).

Se cree que las regiones UC H II existen hasta ~ 10⁵ años después de la formación de estrellas masivas ([De Buizer et al., 2005]).

Tal como se la muestra en la Tabla 7.3, cuatro de las fuentes relevadas contienen regiones HII: G29.96+0.02 (G29), G31.41+0.31 (G31), G34.26+0.15 (G34.26), G45.07+0.13 (G45.07) y G45.12+0.13 (G45.12).

Los HMC constituyen una etapa en la evolución de estrellas masivas en la que ya está formada la protoestrella. Las nubes oscuras infrarrojas (IRDC, por su sigla en inglés) son regiones frías y densas de GMC. En [Rathborne et al., 2010], se sugiere que las IRDC son las precursoras de protoestrellas masivas, algo así como la analogía de glóbulos de Bok para estrellas poco masivas. Se observan como patrones de extinción contra el brillo de fondo en el IR medio del plano galáctico.

Al comenzar su colapso gravitatorio, disminuir la temperatura y aumentar la densidad del gas, se favorece la formación de granos de polvo a partir de las moléculas en estado gaseoso. Si la IRDC evoluciona luego hacia una protoestrella, la energía de esta última (via calentamiento radiativo y/o outflows moleculares) evapora moléculas de la superficie helada de los granos de polvo. La química de los núcleos calientes en estos estadios está determinada por la evaporación

¹Estructuras aisladas que se observan como regiones de extinción ($A_V = 1-25mag$) de estrellas de fondo.

Capítulo 7. Estimación de edades de núcleos moleculares calientes a partir de observaciones de un solo plato

de moléculas de los granos de polvo, y se caracteriza por altas abundancias de moléculas totalmente hidrogenadas, tales como H_2O y moléculas orgánicas complejas (por ejemplo, CH_3OH , CH_3CN). Como la química de las regiones de formación estelar depende sensiblemente de sus condiciones físicas (temperatura, densidad, fracción de ionización), obtener datos de abundancias de estas moléculas constituye una herramienta muy útil para conocer las condiciones físicas de las etapas tempranas de formación estelar ([Liu et al., 2020]).

En cuanto al estudio de la morfología y cinemática de HMC, es preciso tener en cuenta que como su tamaño típico es de $\sim 0,05$ pc, sus distancias típicamente > 5 kpc, los tamaños aparentes son $< 2''$. Hasta la puesta en funcionamiento de ALMA, la máxima resolución que se podía obtener en ondas submilimétricas con un interferómetro (por ej VLA) era del orden de $1''$ ([Cesaroni et al., 2010]).

7.3. Química de HMC

Los HMC se caracterizan por una riqueza química evidenciada en la detección de distintas moléculas a lo largo de las últimas décadas. Estos relevamientos han puesto de manifiesto abundancias relativamente altas de moléculas pequeñas saturadas (H_2O , NH_3 , H_2S , CH_3OH), así como grandes moléculas orgánicas (CH_3CN , CH_2CHCN , $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CN}$, $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). El origen de esta variedad es la sublimación de mantos de hielo formados sobre granos de polvo durante el colapso gravitatorio de la nube molecular. El calentamiento del polvo (que ocasiona la sublimación), es generado por HMPOs embebidos o cercanos ([Calcutt et al., 2014]).

El hielo depositado sobre el polvo constituye pues una especie de registro acumulado de los procesos físicos que ocurren durante el colapso gravitatorio en los HMC ([Viti et al., 2004]). Puede pensarse que la sublimación de hielos ocurre -rápidamente- una vez que la (proto)estrella comienza a fusionar hidrógeno y el incremento de temperatura del polvo es súbito, cuando la estrella ingresa en la fase ZAMS². Pero si el tiempo de contracción t_c , vale decir, el tiempo que transcurre desde el comienzo del colapso hasta que la fusión de hidrógeno comienza, es lo suficientemente largo, entonces la intensidad estelar -y por ende, también la temperatura del polvo- aumenta de tal forma que un incremento súbito o instantáneo no resulta probable. En este escenario, las distintas moléculas evaporan en distinto tiempo, y si t_c es comparable al tiempo de vida típico de HMC, entonces la composición química de HMC sería dependiente del tiempo, y habría una variedad en la composición química de distintos HMC, que es justamente lo que se observa ([Viti and Williams, 1999]).

La ilustración de la Fig. 7.1 ayuda a visualizar cómo, en principio, los fotones UV del HMPO pueden tener una influencia mayor en la química del entorno en el caso de la existencia de un disco o toroide de gas ([Isokoski et al., 2013]), comparado a la ausencia del mismo. Sin embargo, a pesar de que en el primer caso los fotones UV de la protoestrella tienen más probabilidad de escapar el objeto central, pudiendo impactar más en la química del HMC al iluminar las paredes internas del toroide o disco, el análisis de [Isokoski et al., 2013] no muestra una diferencia significativa en las abundancias de moléculas orgánicas complejas³ (en adelante COM, por su sigla en inglés) en fuentes con o sin disco. Una posible explicación es que aun en la ausencia de un disco o toroide, pueden crearse cavidades o chorros (*jets*) por donde fotones UV pueden escapar e influir en la química del HMC ([Isokoski et al., 2013]).

En cualquier caso, el modelo ampliamente aceptado y confirmado por observaciones, es que una vez que nace la protoestrella, el polvo es calentado y las moléculas que se formaron en su superficie comienzan a sublimar, en un proceso que no es instantáneo, y cuya tasa depende de la cantidad inicial de la especie en cuestión depositada sobre la superficie de los granos de polvo, y

²Zero-age main sequence star, etapa inicial de la vida de una estrella ya formada, definida como el punto en que alcanza su radio mínimo, masa y temperatura efectiva máximas

³Moléculas de más de seis átomos, con al menos un átomo de carbono.

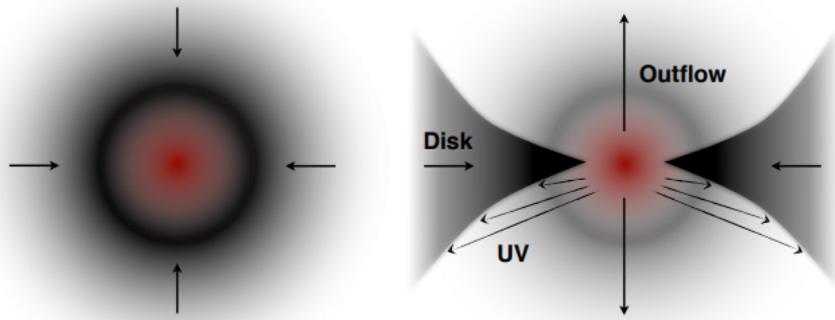


Figura 7.1: Ilustración de dos morfologías posibles de un HMC conteniendo una protoestrella, con geometría esférica (izq.) y con disco achatado y flujos bipolares (der.) (Fuente de imagen: [Isokoski et al., 2013]).

de sus propiedades químicas. Más aun, tal como se demuestra en [Viti et al., 2004], la evolución química del HMC depende de la masa de la (proto)estrella.

Además de la variación temporal en la temperatura de polvo producto de la evolución del HMPO, que impacta en la química en el transcurso del tiempo, existe también una variación espacial dada por la distancia del polvo al HMPO. Esta degeneración tempo-espacial puede ser resuelta mediante observaciones interferométricas, en particular de COM, puesto que trazan las partes centrales (densas, calientes y próximas al HMPO/YSO) de HMC ([Calcutt et al., 2014]).

En los subpartados que siguen se describen algunas de las moléculas detectadas en el presente relevamiento, y los resultados que arrojan algunas simulaciones numéricas de la evolución química de distintas especies en condiciones típicas de HMC.

7.3.1. Cianopolinas

Como ya se indicó en 2.1.4, desde fines de los años '60 se han detectado distintas moléculas en fase gaseosa en el medio interestelar, principalmente moléculas orgánicas compuestas por cadenas de carbono no saturadas. Un grupo de ellas son los hidrocarburos, C_nH , $n=1-8$, y el otro las cianopolinas, moléculas de la forma $HC_{2n+1}N$, donde $n=1,2,3,\dots$ ([Fukuzawa et al., 1998]).

Desde el punto de vista morfológico, las cianopolinas son moléculas lineales con constantes rotacionales relativamente bajas (ver Tabla 2.3).

En [Fukuzawa et al., 1998], se prueba que las reacciones neutras-neutras entre poliacetilenos ($C_{2n}H_2$) y el radical CN:



son la ruta más plausible de formación de cianopolinas en el medio interestelar, por la ausencia de barreras de potencial, especialmente en las zonas interiores de nubes moleculares. En las zonas sometidas a radiación UV de estrellas OB jóvenes, por su parte, predominan las reacciones ion-molécula ([Fukuzawa et al., 1998]).

En [Chapman et al., 2009] se reportan resultados de simulaciones numéricas de evolución de cianopolinas bajo condiciones típicas de HMC, encontrándose que las abundancias relativas de las de mayor orden ($n>1$) con respecto a HC_3N son fuertemente dependientes del tiempo y condicionadas por las condiciones físicas en el núcleo.

Los autores presentan sus resultados para dos temperaturas de gas (100 y 200 K) y dos densidades de gas (8×10^4 y $8 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$). En el análisis que sigue usaremos el escenario

Capítulo 7. Estimación de edades de núcleos moleculares calientes a partir de observaciones de un solo plato

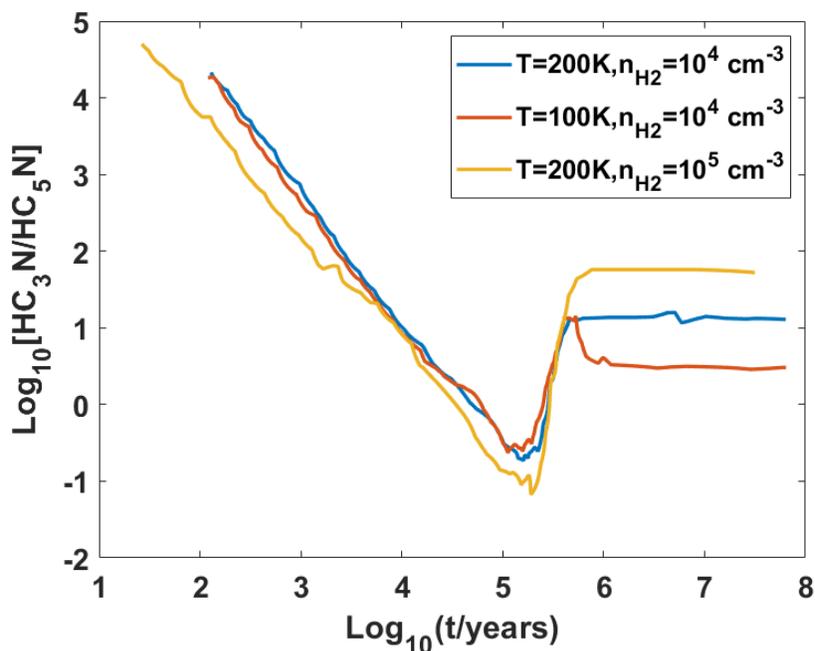


Figura 7.2: Evolución temporal de la abundancia relativa de $\text{HC}_3\text{N}/\text{HC}_5\text{N}$ para tres escenarios físicos distintos, basados en las densidades columnares obtenidas en el modelo químico descrito en [Chapman et al., 2009] (Ver sus Figuras 1, 9 y 10).

más denso, por ser el más apropiado a nuestras fuentes, tal como se describe en el apartado 7.4. Desafortunadamente los autores no reportan resultados para el escenario más denso y de menor temperatura (100 K). Sin embargo, la temperatura del gas — que afecta las tasas de calentamiento — tienen un efecto menor en las abundancias relativas que la densidad del gas.

Esto se ve claramente en la Figura 7.2, que es una digitalización de las Figuras 1, 9 y 10 de [Chapman et al., 2009]. Las curvas muestran la evolución temporal de la abundancia relativa $\text{HC}_3\text{N}/\text{HC}_5\text{N}$ para los tres escenarios considerados en dicho artículo. Las curvas para la misma densidad de gas y distinta temperatura son apenas distinguibles, de modo que es esperable que un escenario con la densidad mayor y menor temperatura, no sea muy distinto que el obtenido con alta densidad ($8 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$) y baja temperatura (100 K).

7.3.2. CH_3CN

Como ya se señaló en 2.1.4, las características espectrales de la molécula CH_3CN hacen que sea muy utilizada para determinar temperaturas de excitación en los núcleos moleculares densos, particularmente a través del método de diagramas rotacionales (ver apartado 2.1.6). Al tratarse de una COM, como ya se mencionó, la abundancia de esta molécula se ve aumentada en entornos calientes ($T=100\text{-}300\text{K}$) y densos ($n_{\text{H}_2} = 10^6 - 10^8 \text{ cm}^{-3}$), por lo que resulta muy útil en trazar las regiones interiores de HMC ([Viti et al., 2004]). Esta molécula es también una buena trazadora de discos o toros de acreción en torno de protoestrellas masivas, como se revela en distintos relevamientos interferométricos, en que se manifiestan como estructuras extendidas, elongadas, y perpendiculares a flujos bipolares ([Rosero et al., 2013]).

7.3.3. CH₃OH

La Figura 7.3 muestra los resultados de simulaciones de evolución temporal de distintas moléculas bajo condiciones de HMC, contenidos en [Viti et al., 2004]. En esta figura se aprecia claramente cómo el metanol (CH₃OH) es un buen indicador de núcleos más evolucionados, pues su abundancia se vuelve relativamente importante en etapas tardías.

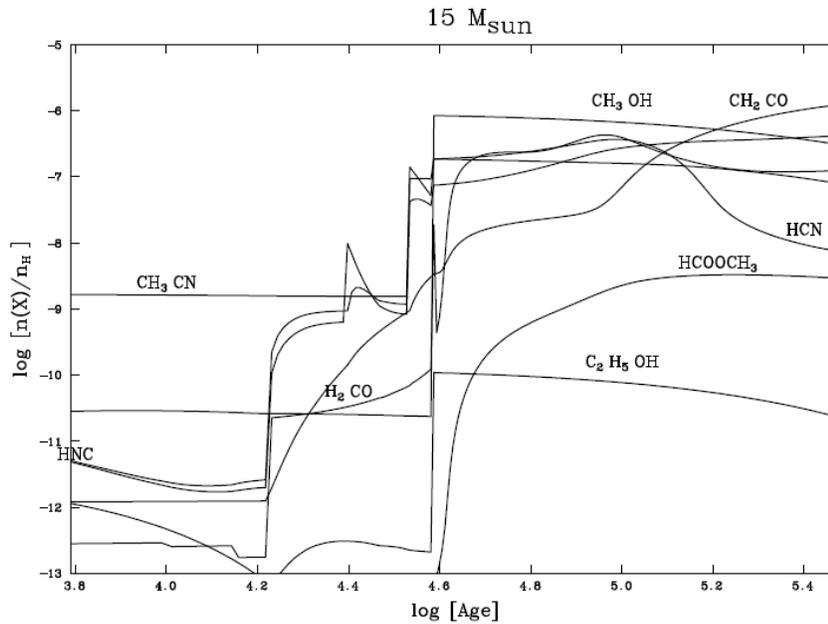


Figura 7.3: Modelos de evolución temporal de abundancias de distintas moléculas grandes en un HMC (Fuente de imagen: [Viti et al., 2004]).

7.3.4. SO₂ y OCS

A diferencia de moléculas grandes como CH₃OH y CH₂CO, cuya tendencia es la misma para todas las masas de HMC simuladas (5 a 25M_⊙), las tendencias de las moléculas sulfuradas dependen fuertemente de la tasa de calentamiento y por ende de la masa de la protoestrella ([Viti et al., 2004]). Las simulaciones reportadas en [Viti et al., 2004] para estas moléculas se muestran en la Figura 7.4, y junto a estudios previos evidencian la sensibilidad de su abundancia a las cambiantes condiciones físico-químicas a lo largo de la vida de HMC, por lo que son fuertemente dependientes del tiempo, lo cual a su vez las convierte, al igual que a las cianopolinas, en buenos "relojes químicos" ([Viti et al., 2004]).

7.4. Fuentes observadas

En este apartado se brinda una breve descripción de cada fuente, realizada a partir de un relevamiento bibliográfico.

Capítulo 7. Estimación de edades de núcleos moleculares calientes a partir de observaciones de un solo plato

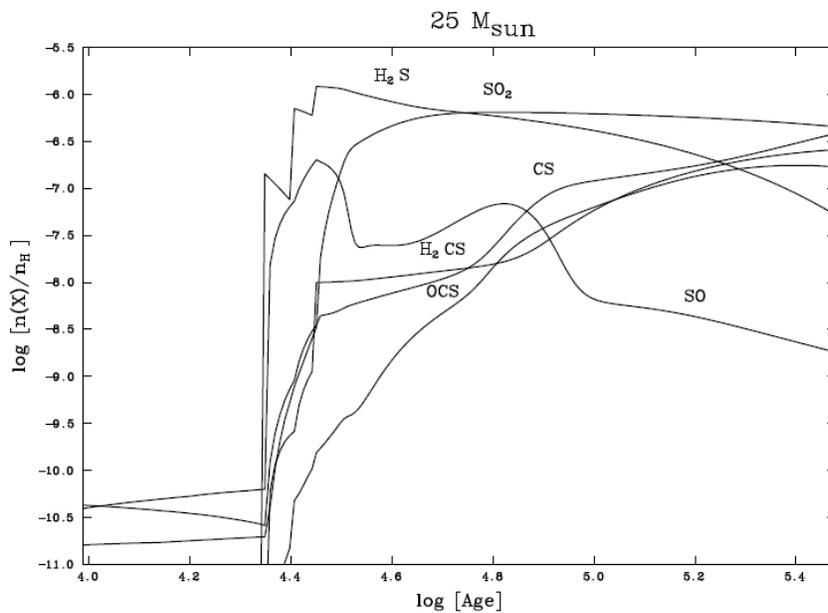


Figura 7.4: Modelos de evolución temporal de abundancias de distintos sulfuros en un HMC (Fuente de imagen: [Viti et al., 2004]).

G29.96-0.02

G29 es una fuente en la que coexisten una región UC HII de forma cometaria con un HMC ubicado al SO del pico de emisión de la primera, que posee una forma de arco (ver Figura 7.5). Está ubicada a 3.5 kpc (Beltran et al. 2011) y está asociada a la fuente infrarroja IRAS 18434 0242. Ha sido mapeada en múltiples moléculas: NH₃, HCO⁺, CS, CH₃CN, HNC y HCOOCH₃ ([Cesaroni et al., 1994a] y citas allí mencionadas). Estos y otros relevamientos (ver citas contenidas en el apartado 3 de [Calcutt et al., 2014]) han puesto de manifiesto la existencia de un flujo molecular en dirección sureste-noroeste, y un toroide de gas en rotación evidenciado por la existencia de un gradiente en velocidad observado en NH₃, CH₃CN, y HN¹³C. Asimismo se han observado máseres de agua, metanol y formaldehído (H₂CO) ([Calcutt et al., 2014]).

El ajuste de modelos a la densidad energética espectral (SED) construida a partir de mediciones en NIR, MIR y mm, arrojan para la HMPO de G29 un límite inferior a la luminosidad de $1.8 \cdot 10^4 L_{\odot}$, correspondiente a una estrella tipo B1, y una tasa de acreción de $10^{-3} - 10^{-2} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ ([De Buizer et al., 2005]).

G31.41+0.31

G31 es un HMC ampliamente estudiado tanto en relevamientos interferométricos ([Gau-me and Mutel, 1987], [Wood and Churchwell, 1989], [Cesaroni et al., 1994a], [Cesaroni et al., 1994b], [Hofner and Churchwell, 1996], [Purcell et al., 2006], [Cesaroni et al., 2010], [Cesaroni et al., 2011], [Moscadelli et al., 2013], [Calcutt et al., 2014]) como de plato único ([Cesaroni et al., 1992], [Wyrowski et al., 1999], [Ikeda et al., 2001], [Araya et al., 2005]). Posee una luminosidad de $3 \cdot 10^5 L_{\odot}$ y se encuentra a una distancia de 7.9 kpc, aunque estimaciones más recientes lo sitúan a unos 3.7 kpc, lo cual implicaría una luminosidad y masa total menores. Si se adopta esta distancia, la luminosidad pasa a ser de $\sim 4.4 \cdot 10^4 L_{\odot}$ y la masa total $\sim 26 M_{\odot}$ ([Beltrán et al.,

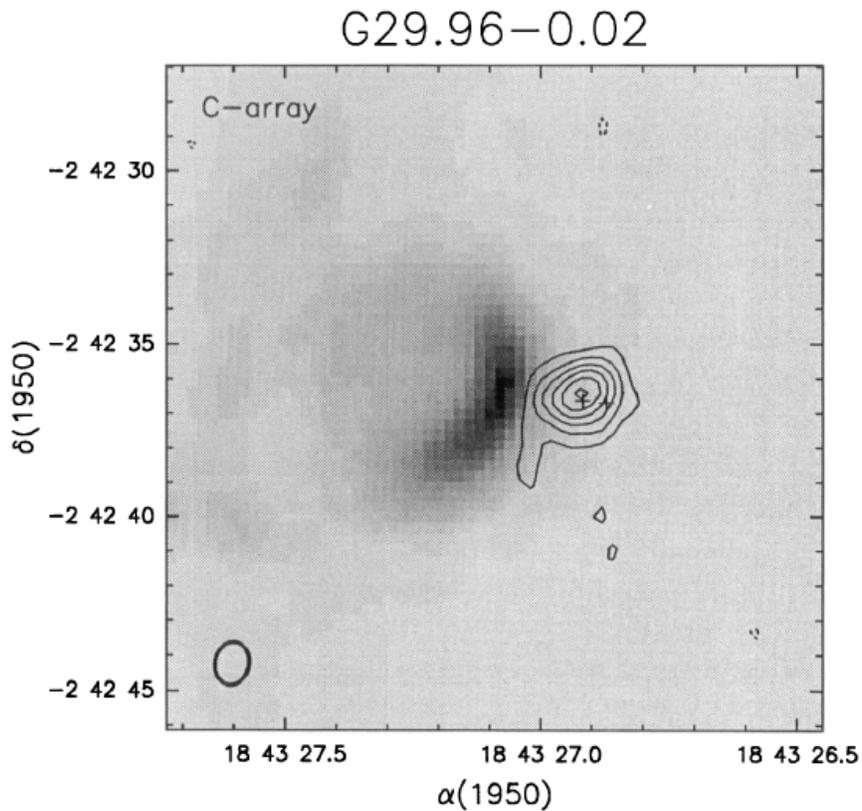


Figura 7.5: Curvas de nivel de la línea $\text{NH}_3(4,4)$ (24139.417 MHz) superimpuestas a mapa de continuo a 1.3 cm (promedio de canales libres de líneas espectrales), obtenidos con el VLA. En esta imagen se aprecia claramente la forma cometaria de la región HII, frente a la cual se ubica el HMC. Las cruces indican la posición de máseres de H_2O (Fuente de imagen: [Cesaroni et al., 1994a]).

2019)).

Este HMC posee una estructura compuesta por dos núcleos, denominados "NE" y "Main" en el trabajo que reveló su existencia a partir de observaciones interferométricas con ALMA ([Beltrán et al., 2018]). El núcleo principal ("Main") tiene un pico de emisión mayor que el NE y es químicamente más rico. Esta fuente ha sido mapeada en diferentes moléculas simples, como SiO , HCO^+ , NH_3 , y varias COMs: CH_3CN , $\text{C}_2\text{H}_5\text{CN}$, $\text{CH}_2(\text{OH})\text{CHO}$ ([Calcutt et al., 2014] y citas allí contenidas). Tiene un diámetro de 5300 UA, y posee 4 fuentes embebidas de emisión libre-libre indicadas como puntos blancos en la Fig. 7.6, lo cual revela que ya está sufriendo procesos de fragmentación, a pesar de la apariencia homogénea del núcleo, debida no a una morfología homogénea sino más bien a una combinación de alta opacidad del continuo de polvo y resolución angular insuficiente ([Beltrán et al., 2019]). Presenta además evidencia de la existencia de un toroide de gas revelado en observaciones de alta resolución de CH_3CN , con una alta tasa de acreción de $\sim 3 \cdot 10^{-2} M_\odot \text{yr}^{-1}$ ([Isokoski et al., 2013]).

Capítulo 7. Estimación de edades de núcleos moleculares calientes a partir de observaciones de un solo plato

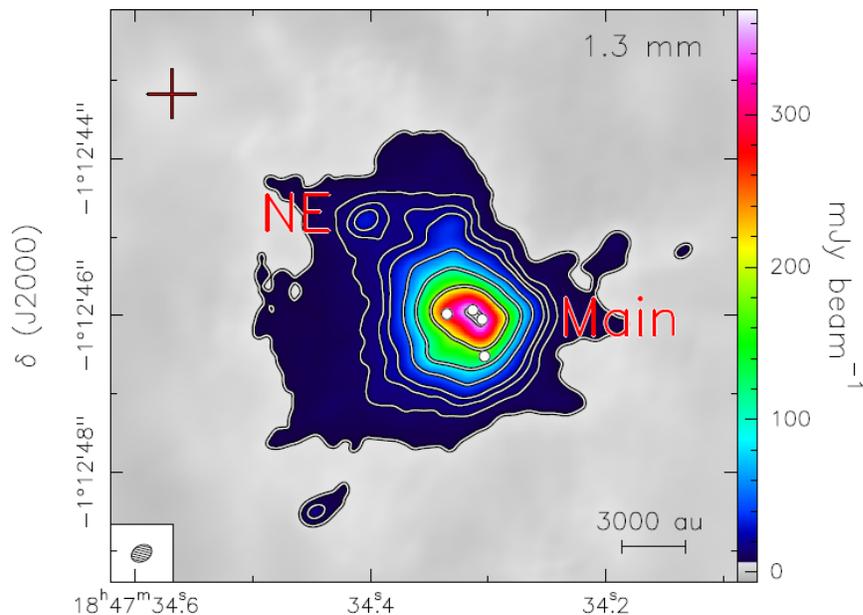


Figura 7.6: Mapa de intensidad a 1.3 mm de G31, obtenido con ALMA. La cruz roja indica la posición de la región UC HII. La morfología de este HMC está compuesta por dos núcleos, denominados en [Beltrán et al., 2018] "Main" y "NE". (Fuente de imagen: [Beltrán et al., 2019])

G34.26+0.15

La tercera fuente más brillante del PSC en $100\mu\text{m}$ es G34 ([Wood and Churchwell, 1989]). Contiene una región UC HII de forma cometaria y dos regiones hipercompactas HII (C, A y B, respectivamente, en la Figura 7.7). Frente al arco cometario se encuentra una región de gas caliente (225 K) y denso ($n_{\text{H}_2} \sim 10^{7.2}\text{cm}^{-3}$), del cual se han detectado máseres de agua ([Hofner and Churchwell, 1996]). Es importante notar que no parece haber evidencia de que este HMC sea calentado internamente por un HMPO, sino más bien por la cercana región UC HII ([Mookerjee et al., 2007]).

G34 está incluida en el estudio de [Rosero et al., 2013], un survey de la línea J=12-11 de CH_3CN en HMC. En dicho trabajo, la detección simultánea de varias componentes K de la estructura hiperfina de esta transición, permitió estimar su temperatura rotacional (236 ± 14 K) y densidad columnar ($18.0 \pm 3 \text{ cm}^{-2}$).

En [Kalenskii et al., 2000] se incluye esta fuente en un relevamiento de las transiciones 6_K-5_K , 5_K-4_K , y 8_K-7_K de CH_3CN (110, 92, y 147 GHz, respectivamente). A partir de diagramas rotacionales, se reportan temperaturas rotacionales de 418 y 295 K para las líneas de 110 y 92 GHz, respectivamente, aunque estos valores deben considerarse límites superiores debido a que estas líneas eran ópticamente gruesas. En este trabajo, se realizan además ajustes de modelos de equilibrio estadístico (SE, por su sigla en inglés) a los ratios de líneas observadas. Este método permite estimar la temperatura cinética del gas y la abundancia de la molécula en cuestión. En este caso, se obtiene $T_K=140$ K (intervalo de confianza 65-220 K) y $X_{\text{CH}_3\text{CN}} \geq 300 \cdot 10^{-10}$. Estos valores corresponden al núcleo de la fuente, ya que un modelo de estructura homogénea no se ajustaba bien a los ratios medidos. Los datos se corresponden más bien con una estructura de núcleo-halo (por "halo" se entiende una envolvente de menor densidad y/o más fría), en concordancia con la estructura revelada en imágenes interferométricas (por ejemplo, [Akeson

7.4. Fuentes observadas

and Carlstrom, 1996)). Esto es coincidente con lo obtenido en [Mookerjea et al., 2007] ($T_K \approx 160 \pm 30$ K).

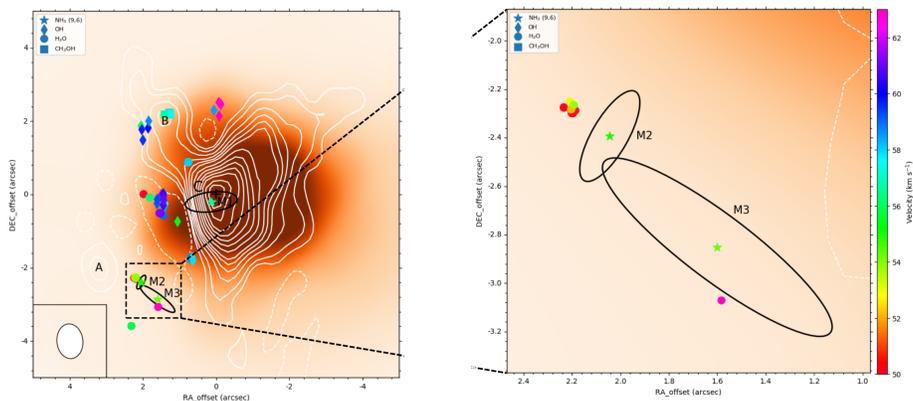


Figura 7.7: Mapa del continuo de G34.26+0.15 a 1.36 cm de G34, obtenido con VLA, superpuesto a imagen GLIMPSE de Spitzer 4.5 μ m. Las elipses negras muestran la emisión de NH₃ (9,6) con estrellas en su centro (M1, M2, and M3). Se indican las posiciones de los máseres de OH, H₂O y CH₃OH como diamantes, círculos y cuadrados, respectivamente (Fuente de imagen: [Yan et al., 2021])

G45.07+0.13 y G45.12+0.13

Estas dos fuentes, separadas algunos minutos de arco entre sí (ver Figura 7.8), albergan una región UC HII cada una.

En el caso de G45.07, mediciones en el infrarrojo medio y lejano revelan la presencia de varias fuentes brillantes. Por ejemplo, en imagen de 11.7 μ m reportada en [De Buizer et al., 2005] (Figura 7.9), aparecen seis focos, el más brillante de los cuales coincide con la ubicación de la región UC HII ya reportada en relevamientos milimétricos ([Wood and Churchwell, 1989], [Hofner and Churchwell, 1996]). Unos 2" al norte de esta región UC HII, aparece una fuente brillante en el IR, identificada como DRT03 3, que no presenta emisión en el continuo de radio (y por lo tanto no contiene una región fotoionizada). La luminosidad en el MIR impone un límite inferior a la luminosidad bolométrica haciéndola corresponder por lo menos a una estrella tipo B0. Por lo tanto, la evidencia parece indicar que el HMC (y su HMPO) se ubican en esta parte del campo de G45.07 (DRT03 3), mientras que la región UC HII sería generada por una estrella tipo O9. El conjunto de fuentes que se muestran en el campo de G45.07 en la Figura 7.9 evidencian que se trata de un pequeño cúmulo de formación estelar, centrado en la estrella O9. El ajuste de modelos a la densidad energética espectral (SED) construida a partir de mediciones en NIR, MIR y mm, arrojan para la HMPO de G45.07 una luminosidad de $2.5 \cdot 10^4 L_{\odot}$, correspondiente a una estrella tipo B1 de 13 M_{\odot} , y una tasa de acreción de $10^{-3} - 10^{-2} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ ([De Buizer et al., 2005]).

En cuanto a G45.12, se trata de una región UC HII, en un estadio evolutivo más avanzado que G45.07, lo cual se evidencia en distintos indicadores: flujo molecular bipolar extendido, mayores temperaturas de antena en mediciones de CO, emisión en continuo milimétrica y submilimétrica más extendida, y ausencia de máseres de agua ([Hunter et al., 1997]). Mediciones de NH₃ han permitido establecer una temperatura rotacional de 32 K ([Olmi et al., 1993]), mientras que se ha estimado densidades columnares del gas de N_{H₂} $\sim 3 \cdot 10^{23} \text{cm}^{-2}$ ([Churchwell et al., 1992]). El ajuste de modelos a la densidad energética espectral (SED) construida a partir de mediciones en entre 10-40 μ m, descrito en [Liu et al., 2019], arrojan una luminosidad de entre 5 y $8.4 \cdot 10^5 L_{\odot}$, aun

Capítulo 7. Estimación de edades de núcleos moleculares calientes a partir de observaciones de un solo plato

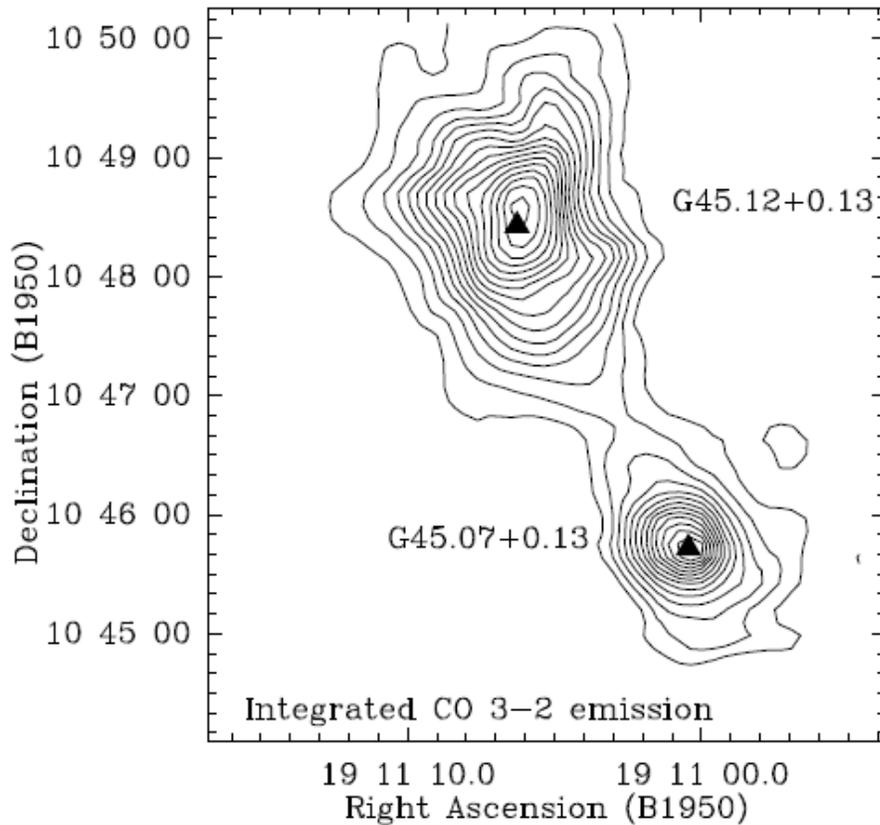


Figura 7.8: Curvas de nivel de la emisión integrada de CO J=3-2 en el campo de las fuentes G45.12 y G45.07. Los triángulos marcan la posición de las regiones UC HII, de acuerdo a [Wood and Churchwell, 1989] (Fuente de imagen: [Hunter et al., 1997]).

cuando los autores admiten que la asunción de una sola protoestrella posiblemente no sea válida, y se trate más bien de un protocúmulo de estrellas ZAMS. La tasa de acreción que obtienen es de entre 1.2 y $1.9 \cdot 10^{-3} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ ([Liu et al., 2019]).

IRAS20126

Este HMC está incluido en el estudio de [Rosero et al., 2013], un survey de la línea J=12-11 de CH_3CN en HMC. En dicho trabajo, la detección simultánea de varias componentes K de la estructura hiperfina de esta transición, permitió estimar su temperatura rotacional (203 ± 13 K) y densidad columnar ($1.2 \pm 0.2 \text{ cm}^{-2}$). En [Rosero et al., 2013] se analiza la velocidad central y FWHM de los ajustes gaussianos a las distintas componentes K de esta transición, encontrándose una marcada tendencia de descenso de la velocidad central de la línea al aumentar la energía de la transición, mientras que para los anchos de las líneas no se observa una tendencia clara (ver Figura 7.11). La detección de las transiciones correspondientes a $K \leq 3$ (menos energéticas) fuera de la posición central (ver Figura 7.10), mientras que las de $K \geq 3$ (más energéticas) se observan solo en la posición central, son consistentes con la existencia de una región central más caliente ($T \geq 50$ K), rodeada por una envolvente más tibia ($T \leq 50$ K). En esta fuente se ha detectado la presencia de un disco de unas 1000 UA, perpendicular a un jet revelado por máseres de agua en

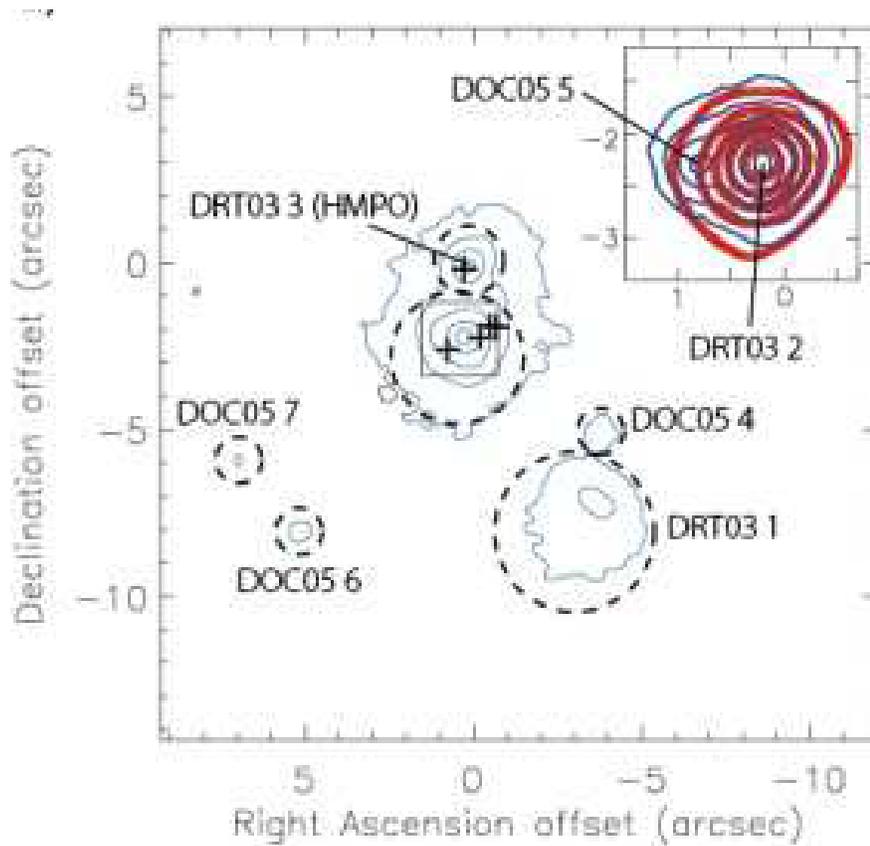


Figura 7.9: Curvas de nivel a $11.7\mu\text{m}$ de G45.07. Las cruces indican la posición de máseres de agua reportados en [Hofner and Churchwell, 1996]. La región UC HII es la encerrada dentro del cuadrado, que se encuentra ampliada en la esquina superior derecha. Unos $2''$ al norte está la fuente identificada como DRT03 3, que albergaría una HMPO (Fuente de imagen: [De Buizer et al., 2005]).

la dirección SENW ([Isokoski et al., 2013]).

DR21(OH)MM1

La región DR21(OH) es una región de formación estelar masiva, ubicada unos $2'$ al norte de la región HII DR21, en la nube molecular Cygnus-X. En la región se identifican dos zonas de intensa emisión en el continuo debido a polvo interestelar, MM1 y MM2, relativamente calientes (~ 50 y 30 K) y masivas (350 y $570 M_{\odot}$). La actividad de formación estelar se ha puesto de manifiesto en la detección de múltiples máseres de OH, H_2O y CH_3OH ([Zapata et al., 2012] y citas allí contenidas).

Esta fuente está incluida en el ya mencionado relevamiento de [Kalenskiĭ et al., 2000]. El análisis de diagramas rotacionales aplicado a esta fuente, arroja temperaturas rotacionales de 48 y 36 K para las líneas de 110 y 92 GHz, respectivamente, y, al igual que en el caso de G34, estos valores deben considerarse límites superiores debido a que estas líneas eran ópticamente gruesas. Los ajustes de modelos de SE a los ratios de líneas observadas, arrojan una temperatura cinética

Capítulo 7. Estimación de edades de núcleos moleculares calientes a partir de observaciones de un solo plato

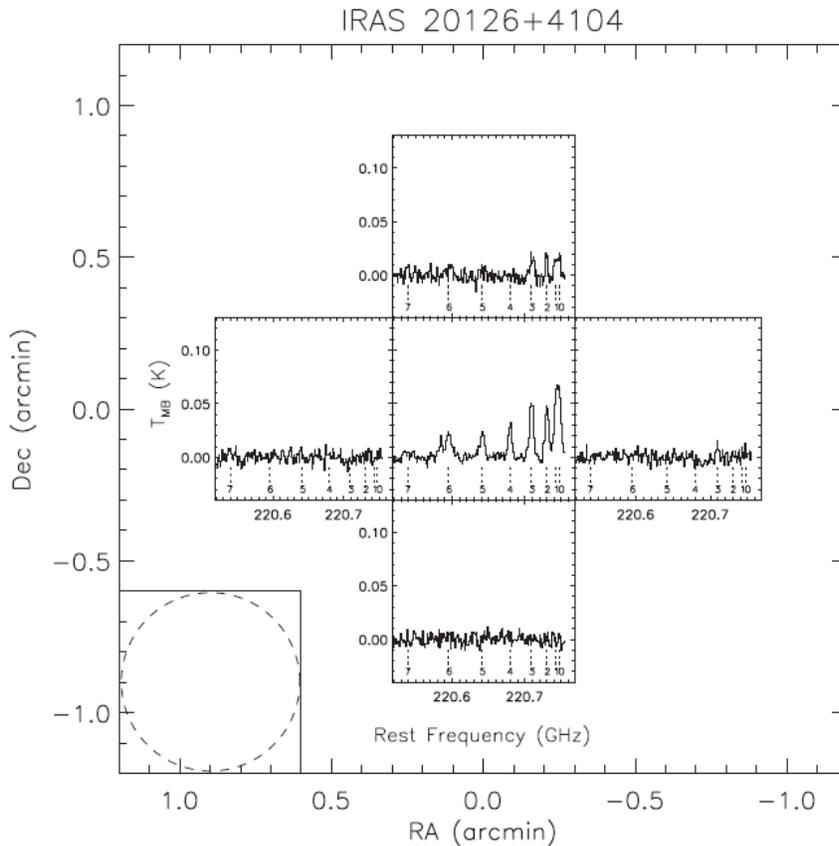


Figura 7.10: Escaneos cruzados de la transición CH₃CN J=12-11 en IRAS20126. Los escaneos están separados un haz completo ($\theta_{mb} = 38''$, indicado en la esquina inferior izquierda). Las componentes K de la transición se indican bajo las líneas punteadas, debajo de cada espectro (Fuente de imagen: [Rosero et al., 2013])

del gas $T_K = 45$ K (intervalo de confianza 40-55 K), $X_{CH_3CN} \geq 10^{-8}$ - 10^{-7} y $n_{H_2} \geq 3 \cdot 10^4 \text{cm}^{-3}$.

En [Zapata et al., 2012] se reportan mediciones de alta resolución ($\sim 1''$) del continuo de radio a 1.4mm de esta región, lográndose resolver hasta 9 fuentes, 5 en MM1 y 4 en MM2 (ver Figura 7.12). Las masas obtenidas para estas fuentes compactas se ubican entre 8 y 24 M_\odot , aunque el límite superior probablemente esté sobreestimado pues corresponde a los núcleos SMA6 y SMA7, que son núcleos calientes para los cuales la temperatura asumida ($T_d \sim 20$ K) está subestimada. A pesar de que SMA6 presenta emisión libre-libre (debida a gas ionizado), lo cual puede contaminar en algo la emisión de continuo y por lo tanto afectar las estimaciones de masa, ello no parece ser significativo a 1.4mm si se asume el índice espectral de [Araya et al., 2009] ($\alpha = 0.6$). En este trabajo también se reportan mediciones de transiciones de CH₃OH, H₂CO, CO y SiO, que confirman el flujo de gas E-W ya revelado en [Araya et al., 2009].

G034.43+00.24-MM1 y G034.43+00.24MM4

G034.43+00.24 es una IRDC que alberga nueve núcleos, nombrados como MM1,...,MM9 (en orden descendente según el pico del flujo a 1.2 mm). Una imagen de esta nube se muestra en

7.4. Fuentes observadas

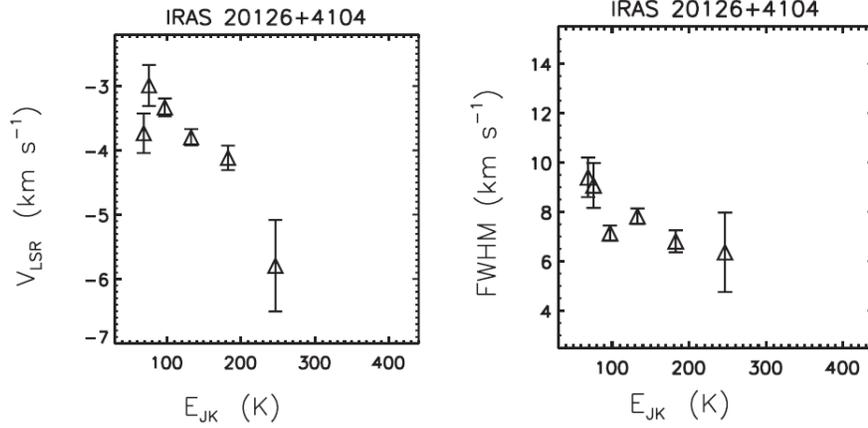


Figura 7.11: Gráficos de velocidad central (izquierda) y FWHM (derecha) de los ajustes gaussianos a transiciones hiperfinas de CH_3CN $J=12-11$, en función de la energía de la transición. (Fuente de imagen: [Rosero et al., 2013])

la Figura 7.13(a). El núcleo MM1, cuya masa estimada es de $1187 M_{\odot}$, tiene un diámetro angular de $16''$, lo cual a su distancia (~ 3.7 kpc) corresponde a 0.19 pc. El núcleo MM4, por su parte, tiene una masa estimada de $253 M_{\odot}$, y diámetro angular de $24''$ (0.38 pc). ([Rathborne et al., 2006]). Es decir, ambos HMC son algo menos compactos que el límite típicamente adoptado para definir estos objetos (0.1 pc). En ambos casos, el diámetro es algo menor al haz principal del GBT a estas frecuencias ($\approx 27''$). Todos los núcleos de esta IRDC, incluidos MM1 y MM4, coinciden con la ubicación de candidatos a objetos estelares jóvenes (YSO, por su sigla en inglés) masivos, y albergan probablemente grumos protoestelares, mostrando varios de ellos evidencias adicionales de formación estelar (máseres de metanol, regiones UCHII, y flujos moleculares, como en el caso de MM1 y MM4 ([Liu et al., 2020] y referencias allí citadas). En [Liu et al., 2020] se reportan cálculos de abundancias de diversas moléculas, bien a partir de diagramas rotacionales (para metanol y $p\text{-H}_2\text{CO}$), bien a partir del cálculo previo de temperatura de excitación y profundidad óptica mediante el cociente de picos de líneas de isotopólogos. De este modo, se reportan densidades columnares de metanol de $\log_{10}(N)=15.1 \pm 14.7 \text{ cm}^{-2}$ y $\log_{10}(N)=15.2 \pm 15.0 \text{ cm}^{-2}$ en el núcleo MM1 y MM4, respectivamente. Las abundancias (relativas a hidrógeno molecular, H_2) de esta molécula son en uno y otro núcleo $\log_{10}(X)=-8.2 \pm -8.6$ y $\log_{10}(X)=-7.3 \pm -7.6$. Las densidades columnares del gas (recalculadas en [Liu et al., 2020]) son de $\log_{10}(N(\text{H}_2))=23.29 \log_{10}\text{cm}^{-2}$ y $\log_{10}(N(\text{H}_2))=22.54 \log_{10}\text{cm}^{-2}$, en MM1 y MM4, respectivamente.

La transición $\text{CH}_3\text{OH}(5-4)$ (~ 241.8 GHz) y su estructura hiperfina es detectada en [Liu et al., 2020] en ambos núcleos, aunque en MM1 se reporta detección en todas las transiciones hiperfinas consideradas (14), mientras que en MM4 se reporta detección solamente de 6. La transición $\text{CH}_3\text{OH}(4-3)$ (~ 218.44 GHz) también está contenida dentro de este relevamiento, y en ambos núcleos se reporta su detección. Ambas transiciones tienen coeficientes de Einstein $A_{ij} \sim 10^{-4.2} \text{ s}^{-1}$. En nuestra banda 2 (7.1) se encuentra la línea $\text{CH}_3\text{OH} 13(2,11)-13(1,12)$ (29.3152 GHz), que tiene un coeficiente de Einstein dos órdenes de magnitud menor que las anteriores ($A_{ij} \sim 10^{-6.8} \text{ s}^{-1}$).

G030.97-00.14MM1 y G031.97+00.07MM1

G030.97-00.14 es una IRDC que alberga dos núcleos, MM1 y MM2. MM1 tiene una masa estimada de $417 M_{\odot}$ y un diámetro angular de $32''$ (0.73 pc). G031.97+00.07 es una IRDC que alberga nueve núcleos. MM1 tiene una masa estimada de $1890 M_{\odot}$ y un diámetro angular de $17''$

Capítulo 7. Estimación de edades de núcleos moleculares calientes a partir de observaciones de un solo plato

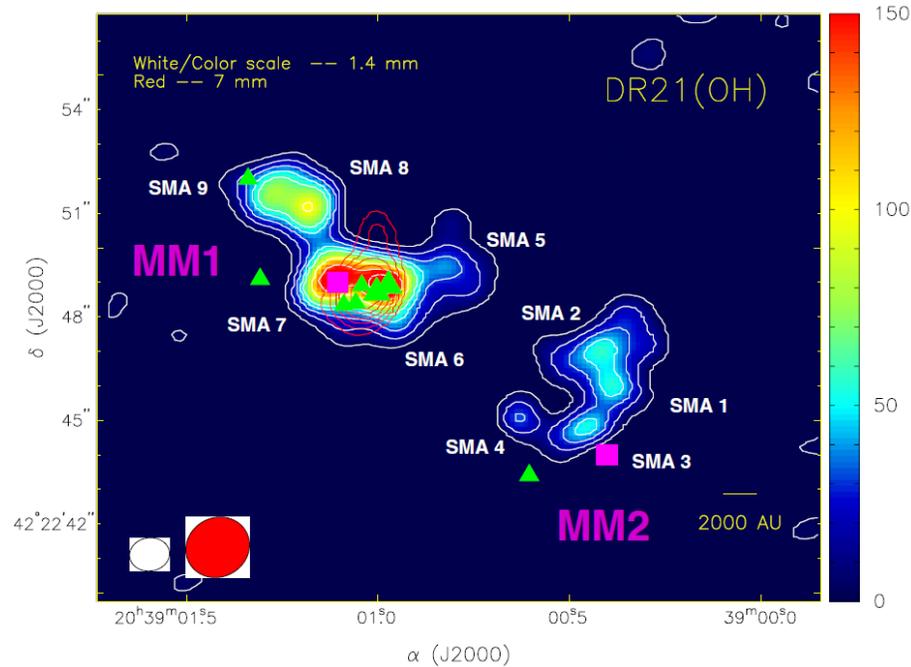


Figura 7.12: Imagen de continuo de radio a 1.4 mm (color y contornos blancos, unidades $\text{mJy}\cdot\text{beam}^{-1}$) de la región DR21(OH) obtenida con el SMA. Los contornos rojos corresponden continuo de radio en 7 mm (Zapata et al. 2009). Los contornos blancos corresponden a 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25, 30, 35, y 40 veces $5 \text{ mJy}\cdot\text{beam}^{-1}$ (rms del ruido de la imagen a 1.4mm). Los contornos rojos son -5, 5, 6, 7, 8, 9, y 10 veces $0.9 \text{ mJy}\cdot\text{beam}^{-1}$ (rms del ruido de la imagen a 1.4mm). Los triángulos verdes indican la posición de las fuentes de radio reportadas por [Araya et al., 2009]. Los cuadrados violetas indican las posiciones de las fuentes de 2.7mm reportadas en [Mangum et al., 1991]. (Fuente de imagen: [Zapata et al., 2012]).

(0.40 pc) ([Rathborne et al., 2006]).

Una imagen de estas nubes se muestran en la Figura 7.13(b) y (c).

Los núcleos o grupos presentes en IRDC pueden contener regiones de gas shockeado, que generan emisión relativamente fuerte en $4.5 \mu\text{m}$. En imágenes compuestas de tres de las cuatro bandas del survey GLIMPSE ([Benjamin et al., 2003]) realizado con Spitzer (en las que rojo corresponde a $8.0 \mu\text{m}$, $4.5 \mu\text{m}$ a verde, y $3.6 \mu\text{m}$ azul) estas regiones se manifiestan como pequeñas regiones difusas verdes, denominadas en la literatura *green fuzzies*. Los mecanismos que pueden dar lugar a este incremento en $4.5 \mu\text{m}$ son emisión espectral favorecida por el shock, particularmente la línea $\text{H}_2 0-0 \text{ S}(9)$ ($\nu = 4.69 \mu\text{m}$) o bien la banda rovibracional $\text{CO } \nu = 1-0$ a $4.5-5 \mu\text{m}$ ([Chambers et al., 2009], y citas allí contenidas). Independientemente de la transición en particular, los *green fuzzies* son trazadores de gas shockeado, probablemente debidos a flujos impulsados por formación estelar.

Durante la acreción de material desde el núcleo o grupo circundante hacia una protoestrella, la pérdida de energía potencial gravitatoria se convierte en energía térmica que calienta el polvo circundante a la protoestrella. Como resultado de esto, el polvo emite como un cuerpo gris (radiación de cuerpo negro con una emisividad constante), y su pico de emisión ocurre típicamente en ondas submilimétricas o infrarrojo lejano. Por ello, este proceso puede trazarse por ejemplo con la detección de emisión en $24 \mu\text{m}$. La resolución necesaria para la detección de esta emisión puntual, es posible con instrumentos como el Multiband Imaging Photometer

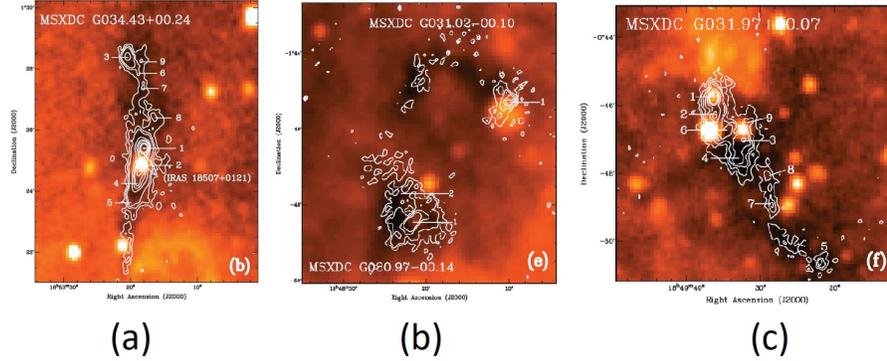


Figura 7.13: Nubes infrarrojas oscuras G034.43+00.24 (a), G030.97-00.14 (b) y G031.97+00.07 (c). Los números indican la posición de los distintos núcleos que alberga cada nube. Las curvas de nivel corresponden a mediciones en radio continuo a 1.2 mm, superpuestas a una imagen en el IR medio ($8 \mu\text{m}$), del MSX $8\mu\text{m}$ Galactic Plane Survey (Fuente de imágenes: [Rathborne et al., 2006])

for Spitzer (MIPS; [Rieke et al., 2004]). Por lo tanto, la detección de fuentes puntuales en esta banda es también un indicativo de formación estelar. En [Chambers et al., 2009] se presentan los resultados de un algoritmo de búsqueda de *green fuzzies* y de fuentes de $24 \mu\text{m}$ en una muestra de las 38 IRDC más oscuras de las 313 para las cuales ha sido posible la determinación de su velocidad LSR y por lo tanto sus distancias cinemáticas (de lo cual a su vez se puede calcular tamaños y masas), de las 10.931 IRDC que componen el catálogo de IRDC confeccionado por los autores a partir de imágenes MSX $8\mu\text{m}$. Las nubes G030.97 y G031.97 forman parte de esta muestra, y los resultados arrojan que para ambos núcleos considerados en el presente relevamiento (G030.97-00MM1 y G031.97+00MM1) se detectó tanto *green fuzzies* como fuentes de $24 \mu\text{m}$, por lo tanto constituyen lo que los autores clasifican como "núcleos activos" (*active cores*). Estos son núcleos en etapas de formación posteriores a la formación de la protoestrella, a diferencia de los quiescentes, que se encuentran en etapas más tempranas de evolución estelar, manifestadas en la ausencia de *green fuzzies* y/o de fuentes puntuales de $24 \mu\text{m}$. A su vez, varios de los núcleos activos que encontraron los autores en su relevamiento, presentaron además líneas de máseres de agua, y en menor medida metanol. En el caso de los núcleos que componen el presente relevamiento, se detectó máseres de agua en ambos, aunque solo se detectaron líneas térmicas de metanol, en G31.97+00MM1 ([Chambers et al., 2009]). En [Sanhueza et al., 2012] se reporta un survey de distintas líneas en 3mm para un subconjunto de la muestra de IRDCs contenida en [Rathborne et al., 2006]. En este survey se incluye G030.97-00MM1 pero no G31.97+00MM1, pues la separación angular entre este último y otro grumo adyacente es menor que el haz principal del telescopio utilizado (MOPRA, de 22m, $\theta = 38''$ a 3mm).

7.5. Observaciones

Las observaciones se llevaron adelante entre enero y febrero de 2011 utilizando el Robert C. Byrd Green Bank Telescope (GBT; entonces perteneciente al *National Radio Astronomy Observatory*) y sus receptores en banda Ka Ka-F1 (26.0 – 31.0 GHz) y Ka-F2 (30.5 – 37 GHz), ambos de una sola polarización. Se utilizaron cuatro ventanas espectrales, centradas en 26.693, 29.313, 36.437 y 36.832 GHz (en adelante, ventanas 1 – 4, respectivamente), de 200 MHz de ancho de banda y resolución espectral 24.41 kHz (0.2 km s^{-1}) cada una.

Las eficiencias de apertura (η_{ap}) fueron 59, 56, 50 y 49 % en las ventanas 1 – 4, respectivamente, mientras que la eficiencia del haz principal (η_{mb}) fue asumido igual a $1.32\eta_{ap}$. El HPBW

Capítulo 7. Estimación de edades de núcleos moleculares calientes a partir de observaciones de un solo plato

estuvo entre 20" y 25", y la temperatura de sistema estuvo típicamente en el rango 60 – 90 K. Se realizó switcheo de posición dual para todas las observaciones y los niveles rms de ruido se ubicaron entre 50 – 120 mK en las ventanas 1 y 3, y 10 – 40 mK en las ventanas 2 y 4.

Número	Front- y back-end GBT	Ventana espectral [GHz]
1	Ka-band MM-F1 (26.0-31.0 GHz) GBT spectrometer - spectral line mode	26.593-26.793
2	Ka-band MM-F1 (26.0-31.0 GHz) GBT spectrometer - spectral line mode	29.213-29.413
3	Ka-band MM-F2 (30.5-37.0 GHz) GBT spectrometer - spectral line mode	36.337-36.537
4	Ka-band MM-F2 (30.5-37.0 GHz) GBT spectrometer - spectral line mode	36.732-36.932

Tabla 7.1: Bandas utilizadas en la observación de los HMC.

Las moléculas HC₃N y HC₅N fueron el objetivo principal de las observaciones, junto con CH₃CN; sin embargo, varias otras moléculas emiten dentro de nuestra banda (ver 7.6). Las ventanas 1 hasta 4, fueron diseñadas para la detección de las líneas HC₃N 10 – 9, HC₅N 11–10, HC₃N 4 – 3, y CH₃CN 2 – 1, respectivamente (ver Tabla 7.2).

Banda	Molécula	Transición	Frecuencia [MHz]
1	HC ₅ N	$J = 10 - 9, v = 0$	26626.80
	HC ₅ N	$J = 10 - 9, v_{11} = 1$	26693.80
2	HC ₅ N	$J = 11 - 10, v = 0$	29289.15
	HC ₅ N	$J = 11 - 10, I = 1e, v_{11} = 1$	29337.58
	HC ₅ N	$J = 11 - 10, I = 1f, v_{11} = 1$	29363.18
3	HC ₃ N	$J = 4 - 3, (0, 0, 0, 0)$	36392.32
	HC ₃ N	$J = 4 - 3, (0, 0, 1, 0)$	36480.56
	HC ₃ N	$J = 4 - 3, (0, 0, 0, 1)$	36481.80
4	CH ₃ CN	$J = 2_1 - 1_1, v_8 = 1$	36869.79
	CH ₃ CN	$J = 2_0 - 1_0, v_8 = 1$	36795.47

Tabla 7.2: Algunas de las líneas de cianopolinas presentes en las bandas seleccionadas.

Las fuentes observadas y las respectivas direcciones de apuntamiento se listan en la Tabla 7.3. La muestra consiste en 8 HMC y tres núcleos masivos. Cinco de los HMC contienen una región UC HII dentro del campo.

7.6. Resultados

Los espectros obtenidos y reducidos con GBTIDL y rutinas propias se muestran en las Figuras 7.14-7.17.

Las transiciones detectadas se sintetizan en la Tabla 7.4. La detección de una determinada molécula está marcada con una X en la Tabla 7.5, y los parámetros de ajuste de las líneas detectadas (velocidad central, emisión integrada, pico de temperatura de la línea y ancho) están contenidas en el Anexo D. Como muestra la Tabla 7.5, las cianopolinas fueron detectadas en todas las fuentes exceptuando G45.12; en G45.07 solo se detectó HC₃N. La transición HC₃N $J=4-3$ contenida en la ventana 3, en algunos casos tenía componentes hiperfinas no resueltas.

7.6. Resultados

Fuente	RA	DEC	VLSRK [km·s ⁻¹]	d [kpc]	Grupo	HII
G29.96+0.02	18:46:04.06	-02:39:21.1	+98.9 ^a	3.5 ^a	HMC	Sí
G31.41+0.31	18:47:34.10	-01:12:53.2	+97.8 ^b	8.5 ^b	HMC	Sí
G34.26+0.15	18:53:18.55	+01:14:57.9	+58.8 ^c	3.7 ^c	HMC	Sí
G45.07+0.13	19:13:21.98	+10:50:53.8	+60.0 ^d	9.7 ^e	HMC	Sí
G45.12+0.13	19:13:27.82	+10:53:38.4	+58.7 ^e	7.4 ⁱ	HMC	Sí
IRAS20126	20:14:24.93	+41:13:17	-3.5 ^c	1.7 ^c	HMC	No
DR21(OH)MM1	20:39:00.15	+42:22:37.6	-3.1 ^f	2.0 ^j	HMC	No
G34.43+00MM1	18:53:17.19	+01:25:30.4	+57.1 ^g	3.7 ^g	HMC	No
G034.43+00MM4	18:53:18.74	+01:24:10.6	+57.1 ^g	3.7 ^g	núcleo masivo	No
G030.97-00MM1	18:48:20.58	-01:48:32.8	+77.8 ^h	5.0 ^h	núcleo masivo	No
G031.97+00MM1	18:49:35.62	-00:46:01.9	+95.0 ^h	6.5 ^h	núcleo masivo	No

Tabla 7.3: Lista de fuentes seleccionadas.

- ^a [Beltrán et al., 2011]
^b [Araya et al., 2005]
^c [Rosero et al., 2013]
^d [Hofner and Churchwell, 1996]
^e [Wood and Churchwell, 1989]
^f [Kalenskii et al., 2000]
^g [Rathborne et al., 2006]
^h [Sanhueza et al., 2012]
ⁱ [Liu et al., 2019]
^j [Odenwald and Schwartz, 1993]

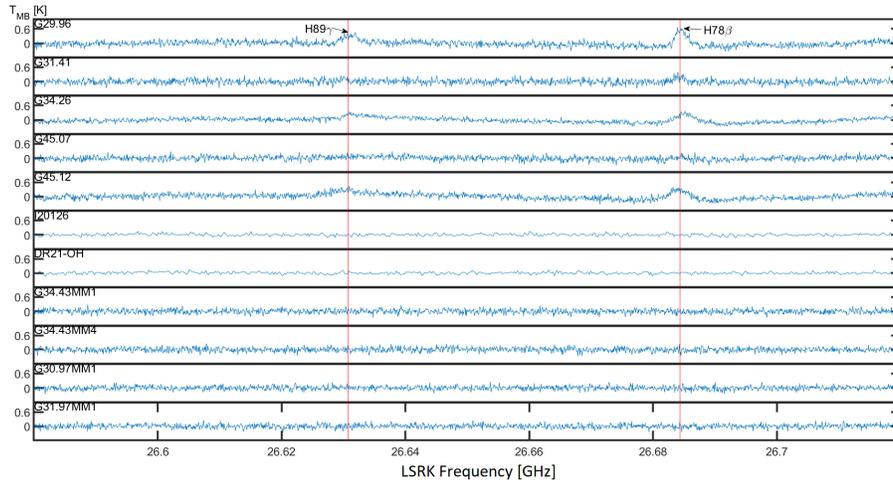


Figura 7.14: Espectros de la ventana 1 para todas las fuentes. Las líneas de recombinación de Hidrógeno H89 γ y H78 β fueron detectadas en fuentes conteniendo regiones UC HII.

En estos casos se ajustó una única gaussiana, y utilizamos la frecuencia central correspondiente a la componente F más fuerte, o sea F=5–4. SO₂ también muestra una tasa de detección alta, habiendo sido detectada en 9 de las 11 fuentes (8 HMC y 1 núcleo masivo). Tanto ¹³CH₃OH como OCS fueron detectadas en las mismas 4 fuentes: G29.96, G31.41, G34.26 y G34.43MM1.

Capítulo 7. Estimación de edades de núcleos moleculares calientes a partir de observaciones de un solo plato

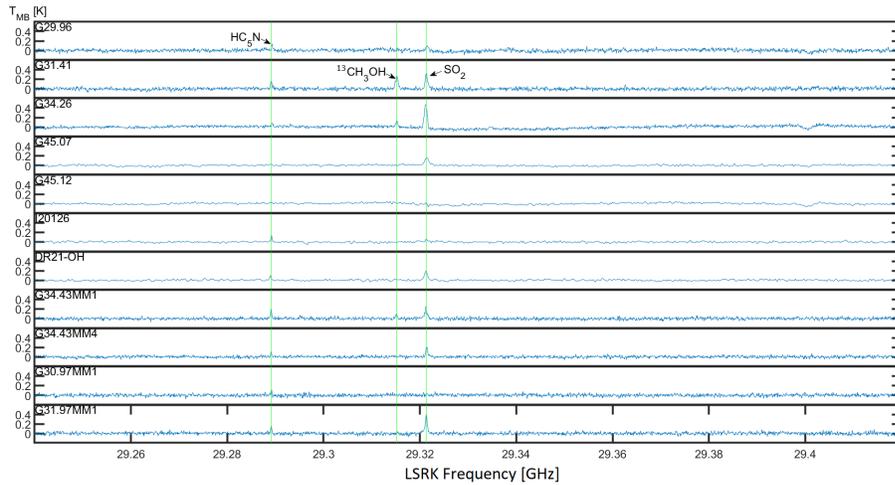


Figura 7.15: Espectros de la ventana 2 para todas las fuentes, conteniendo las transiciones $J=11-10$ $\nu=0$ HC_3N , $30(7,24)-31(6,25)$ CH_3OH y $J=4-3$ SO_2 transitions.

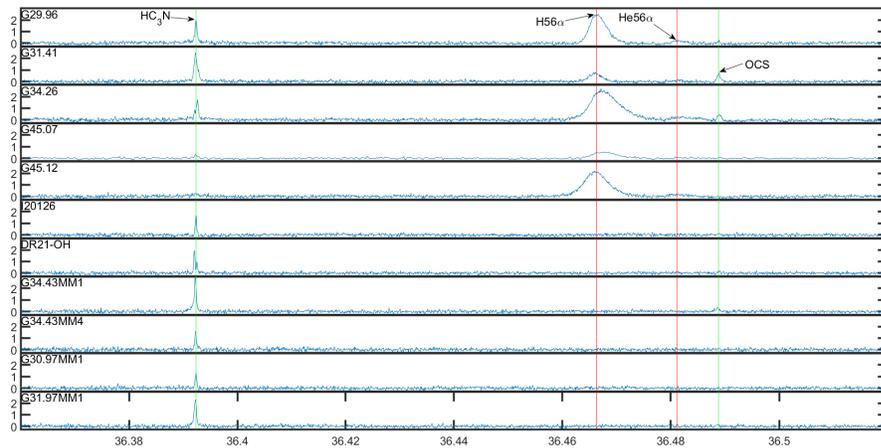


Figura 7.16: Espectros de la ventana 3 para todas las fuentes, conteniendo las transiciones $J=4-3$ HC_3N , las líneas de recombinación $\text{H}56\alpha$, $\text{H}80\gamma$ y $\text{He}56\alpha$, así como la transición $15(2, 13)-15(2, 14)$ OCS .

7.6.1. Líneas de recombinación

Cuatro líneas de recombinación de Hidrógeno (HRLs) estaban presentes en nuestras ventanas: dos en la ventana 1 ($\text{H}89\gamma$ y $\text{H}78\beta$), una en la ventana 3 ($\text{H}56\alpha$) y una en la ventana 4 ($\text{H}70\beta$). Asimismo, una línea de recombinación de Helio estaba presente en la ventana 3 ($\text{He}56\alpha$).

Las líneas $\text{H}89\gamma$ y $\text{He}56\alpha$ solo fueron detectadas ($T_{mb} > 3\sigma_{rms}$) en G29.96. Es interesante notar que estas líneas *no* fueron detectadas ni en G34.26 ni en G45.12, aun cuando ambas fuentes tienen sustancialmente mayores flujos centimétricos que G29.96 [Wood and Churchwell, 1989].

Los resultados de los ajustes gaussianos a las líneas de recombinación se muestran en la Tabla 7.6, con las frecuencias de reposo indicadas al pie de la misma. G45.07 es la fuente que exhibe las líneas HRL más débiles, lo cual es consistente con la idea de que su región UC HII

7.6. Resultados

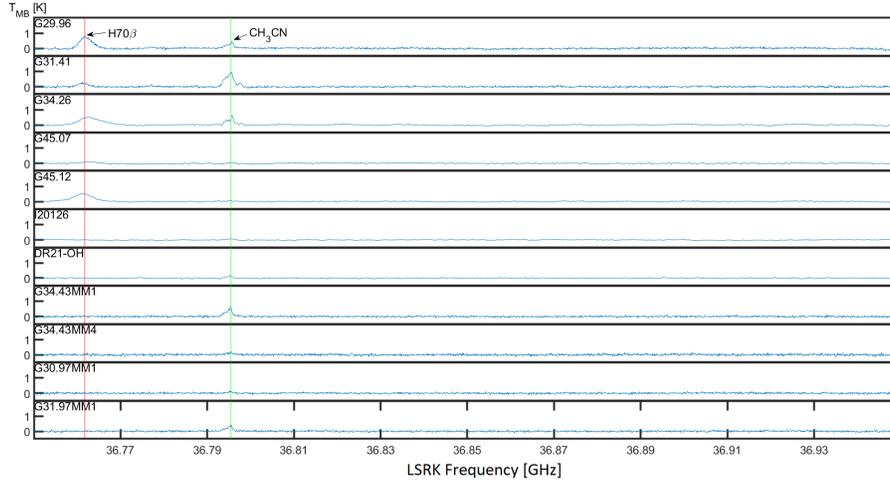


Figura 7.17: Espectros de la ventana 3 para todas las fuentes, conteniendo las transiciones $J=2-1$ CH_3CN y la línea de recombinación $\text{H70}\beta$ HRL.

Tabla 7.4: Resumen de las transiciones moleculares detectadas.

Ventana espectral #	Molécula	Transición	Frecuencia [MHz]	E_{upper} [K]
2	HC_5N	$J = 11 - 10, v = 0$	29289.152 ^a	8.43
	$^{13}\text{CH}_3\text{OH}$	13(2,11)-13(1,12)	29315.200 ^a	228.61
	SO_2	4(0,4) - 3(1,3)	29321.333 ^b	9.15
3	HC_3N	$J = 4 - 3, F = 5 - 4$	36392.363 ^a	4.36
	OCS	3 - 2	36488.813 ^b	3.50
4	CH_3CN	$J = 2 - 1, v = 0, K = 1$	36794.765 ^b	9.79
	CH_3CN	$J = 2 - 1, v = 0, K = 0$	36795.475 ^b	2.65

^a [Müller et al., 2005]

^b [Pickett et al., 1998]

region está en una etapa evolutiva temprana, con una tasa de acreción lo suficientemente alta como para limitar su crecimiento [De Buizer et al., 2005].

Aunque se reportan los parámetros de los ajustes a las HRL, estas no son útiles como 'relojes', y no las consideramos en el análisis que sigue.

7.6.2. Datación de fuentes

Si aplicamos la Ec. 2.65 a las transiciones detectadas de HC_3N y HC_5N , podemos obtener abundancias relativas entre estas dos cianopolinas. Seguidamente, podemos aplicar a estas fuentes que contienen núcleos calientes el modelo químico de [Chapman et al., 2009], que como ya se dijo simula la evolución temporal de cianopolinas bajo condiciones físicas típicas de HMC. Aquí utilizamos sus resultados para el escenario más denso ($8 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$), que es el más adecuado a nuestras fuentes (ver 7.4).

Las abundancias relativas obtenidas con la Ec. 2.65 se muestran en la figura 7.18. Cabe des-

Capítulo 7. Estimación de edades de núcleos moleculares calientes a partir de observaciones de un solo plato

Tabla 7.5: Resumen de detecciones moleculares y tasas de detección.

Source	HC ₃ N	HC ₅ N	SO ₂	OCS	¹³ CH ₃ OH	CH ₃ CN
G29.96	X	X	X	X	X	X
G31.41	X	X	X	X	X	X
G34.26	X	X	X	X	X	X
G45.07	X		X			X
G45.12						
IRAS 20126	X	X	X			X
DR21(OH)MM1	X	X	X			X
G34.43MM1	X	X	X	X	X	X
G34.43MM4	X	X	X			X
G30.97MM1	X	X				X
G31.97MM1	X	X	X			X
Tasa de detección	91 %	73 %	82 %	36 %	36 %	91 %

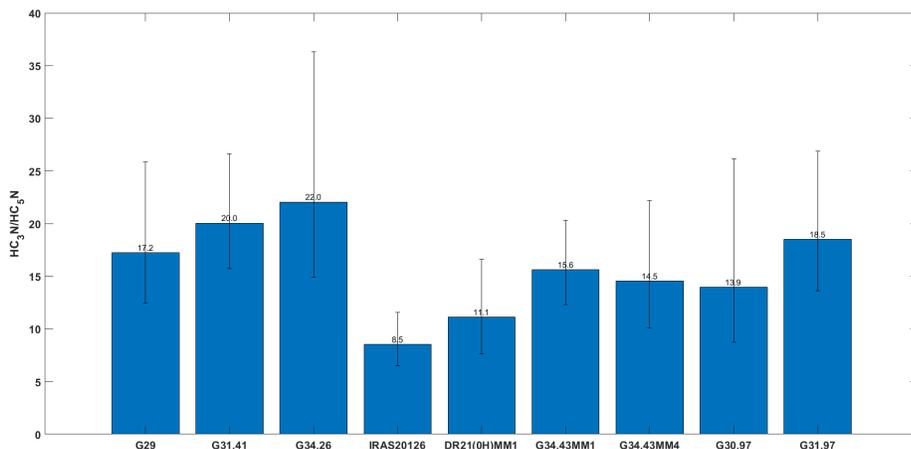


Figura 7.18: Abundancias relativas de HC₃N con respecto a HC₅N, obtenidas a partir de las integrales de línea y la Ec. 2.64. Las barras de error corresponden al método de max/min utilizando los errores especificados en D.1.

tacar que estas abundancias relativas conducen a una ambigüedad en la datación de las fuentes, puesto que intersecan a la curva del modelo de la Figura 7.2 en dos regiones, una temprana (~5-10 kyr) y otra posterior (~370-440 kyr). Las edades obtenidas de las intersecciones de las abundancias relativas con la curva del modelo se muestran en la Tabla 7.7, para cada región.

7.6.3. Cinemática

Para determinar si las distintas moléculas trazan la misma región de gas, analizamos la correlación entre las velocidades centrales de las diferentes líneas moleculares con respecto a HC₃N. Elegimos esta molécula de referencia por tener la tasa de detección más alta (91 %) y también por tener bajas incertidumbres en sus parámetros de ajuste comparado a otras moléculas con alta tasa de detección como HC₅N y SO₂. La Figura 7.19 muestra que para todas las fuentes, las velocidades de HC₅N y HC₃N son coincidentes, como es esperable. Lo mismo aplica a OCS en

Tabla 7.6: Líneas de recombinación observadas.*

Fuente	Línea	V_{LSR} [km s ⁻¹]	$\int T_{mb} dv$ [K km s ⁻¹]	T_{mb} [K]	FWHM [km s ⁻¹]	σ_{rms} [mK]
G29.96	H89 γ^a	93.9 (18)	12 (2)	0.33 (4)	33 (4)	106
	H78 β^b	96.9 (13)	12 (2)	0.58 (8)	20 (3)	
	H56 α^c	95.2 (3)	76.2 (16)	2.44 (4)	29.4 (6)	95
	He56 α^d	95 (2)	3.9 (10)	0.20 (4)	18 (4)	
	H70 β^e	96.7 (4)	21.0 (7)	0.74 (2)	26.6 (8)	
G31.41	H89 γ	ND	ND	ND	ND	75
	H78 β	100 (2)	4.5 (14)	0.22 (6)	19 (6)	
	H56 α	99.5 (5)	17.3 (9)	0.69 (3)	23.6 (13)	79
	He56 α	ND	ND	ND	ND	
	H70 β	101.1 (7)	5.6 (4)	0.23 (2)	22.9 (17)	
G34.26	H89 γ	ND	ND	ND	ND	116
	H78 β	49 (3)	7.3 (22)	0.27 (7)	25 (7)	
	H56 α	46.2 (4)	132 (3)	2.43 (4)	50.9 (10)	123
	He56 α	ND	ND	ND	ND	
	H70 β	48.5 (8)	24.8 (9)	0.48 (2)	48.7 (20)	
G45.07	H89 γ	ND	ND	ND	ND	83
	H78 β	ND	ND	ND	ND	
	H56 α	47.5 (12)	22.9 (15)	0.52 (3)	41 (3)	56
	He56 α	ND	ND	ND	ND	
	H70 β	52.0 (2)	3.1 (5)	0.10 (1)	29 (5)	
G45.12	H89 γ	ND	ND	ND	ND	127
	H78 β	61 (3)	8.5 (24)	0.30 (7)	27 (7)	
	H56 α	59.1 (3)	96.5 (17)	2.05 (3)	44.2 (8)	103
	He56 α	ND	ND	ND	ND	
	H70 β	62.3 (7)	22.9 (8)	0.49 (1)	44.1 (15)	

* Entre paréntesis se indican las incertidumbres 2σ en unidades de menor cifra significativa (por ej., 93.9 (18) significa 93.9 ± 1.8). Las frecuencias centrales son: ^(a)26.63071 GHz; ^(b)26.68434 GHz; ^(c)36.46626 GHz; ^(d)36.48112 GHz; ^(e)36.76172 GHz.

las cuatro fuentes en que fue detectada, y a CH₃OH, con la excepción de G34.26. SO₂ muestra mayores desviaciones de la velocidad de HC₃N, y su velocidad no está dentro de los límites ± 0.5 km s⁻¹ en DR21(OH)MM1, G34.26, G34.43MM4 y G31.97MM1.

Se puede extraer información útil también de los anchos de línea. Nuestra resolución angular (~ 25 – $30''$) es inadecuada para resolver estructuras de pequeña escala (outflows, discos rotantes o toros), y nuestros datos no permiten encontrar gradientes en los centros de línea, como el análisis realizado por ejemplo en [Rosero et al., 2013]. De todas formas, podemos asumir, como en [Liu et al., 2020], que en nuestra muestra los anchos de línea están dominados por turbulencia.

La Figura 7.20 muestra un diagrama de Box-Whisker de los FWHM por molécula para todas las fuentes en donde fueron detectadas. Es de notar que las moléculas sulfuradas (SO₂ and OCS) tienen los mayores anchos. SO₂ muestra una mediana de 6.3 km s⁻¹ y un rango intercuartil (IQR) de 7.0 – 5.2 km s⁻¹, mientras que OCS tiene una mediana de 6.0 y un IQR de 7.0 – 3.5 km s⁻¹. En la parte de menores anchos, están las cianopolinas, con medianas de 4.0 (IQR 6.0 –

Capítulo 7. Estimación de edades de núcleos moleculares calientes a partir de observaciones de un solo plato

Tabla 7.7: Datación de fuentes basada en detecciones y modelos químicos disponibles.*

Fuente	Edad región tardía [10 ³ años]	Edad región joven [10 ³ años]
G29.96	427 (22)	6.2 (18)
G31.41	436 (15)	5.8 (12)
G34.26	441 (47)	4.8 (19)
IRAS20126	374 (21)	9.8 (18)
DR21(OH)MM1	393 (29)	8.5 (21)
G34.43MM1	421 (17)	6.5 (10)

* Los números entre paréntesis indican estimación de incertidumbres basadas en las incertidumbres de las abundancias relativas, en unidades de menor cifra significativa (por ej. 427 (22) significa 427 ± 22).

3.0) y 3.1 (IQR 3.9 – 2.8) km s⁻¹ para HC₃N y HC₅N, respectivamente. Estos resultados están en concordancia con los obtenidos por [Liu et al., 2020] para los nueve núcleos de IRDC G34, para los cuales los autores también obtienen los mayores anchos para moléculas sulfuradas (SO), junto a SiO.

La 7.21 muestra un diagrama de Box-Whisker de los anchos de líneas organizados por fuente. Aquí puede identificarse visualmente tres clases principales: fuentes altamente turbulentas (G31.41 y G34.26, con medianas de 6.2 y 5.8 km s⁻¹, respectivamente), moderadamente turbulentas (G34.43MM1 y G31.97MM1, ambas con medianas de 4.5 km s⁻¹) y fuentes poco turbulentas (G29.96, IRAS20126, DR21(OH)MM1, G34.43MM4 y G30.97MM1, con medianas entre 2.5 y 3.2 km s⁻¹).

7.7. Discusión

Como se menciona en la sección 7.6, las moléculas que contienen azufre (SO₂ y OCS) muestran los anchos de línea más grandes. En el caso de OCS, es interesante observar que su detección coincide con la detección de ¹³CH₃OH, un conocido trazador de gas shockeado. Sin embargo, si observamos las fuentes que contienen emisiones tanto de SO₂ como de OCS (G29.96, G31.41, G34.26 y G34.43MM1), no vemos una tendencia clara de anchos de línea más amplios en comparación con las cianopolinas. lo que sugiere que ambas clases de moléculas trazan la misma región del gas.

La detección de OCS puede ser indicativa de una etapa más evolucionada del núcleo molecular, ya que la abundancia de OCS aumenta monótonamente con el tiempo (p. ej., ver [Viti et al., 2004]) y/o una mayor velocidad de calentamiento, es decir, un HMPO más masivo. Una combinación de los dos factores es particularmente clara en el caso de G34.43MM1 en comparación con el núcleo vecino G34.43MM4, ya que se sabe que el primero se encuentra en una etapa más evolucionada, y además su luminosidad total es aproximadamente un factor de 5 superior (ver Sección 7.4).

Se pueden aplicar argumentos similares a SO₂. Es decir, su detección probablemente refleje una etapa más evolucionada y/o una fuente más masiva y luminosa que calienta el polvo. Que la tasa de detección de SO₂ sea significativamente mayor que la de OCS es consistente con las simulaciones numéricas descritas en [Viti et al., 2004]: para la misma masa protoestelar, la abundancia de SO₂ es siempre significativamente mayor que la de OCS.

Suponemos que todas las fuentes de nuestra muestra clasificadas como HMC deben fecharse

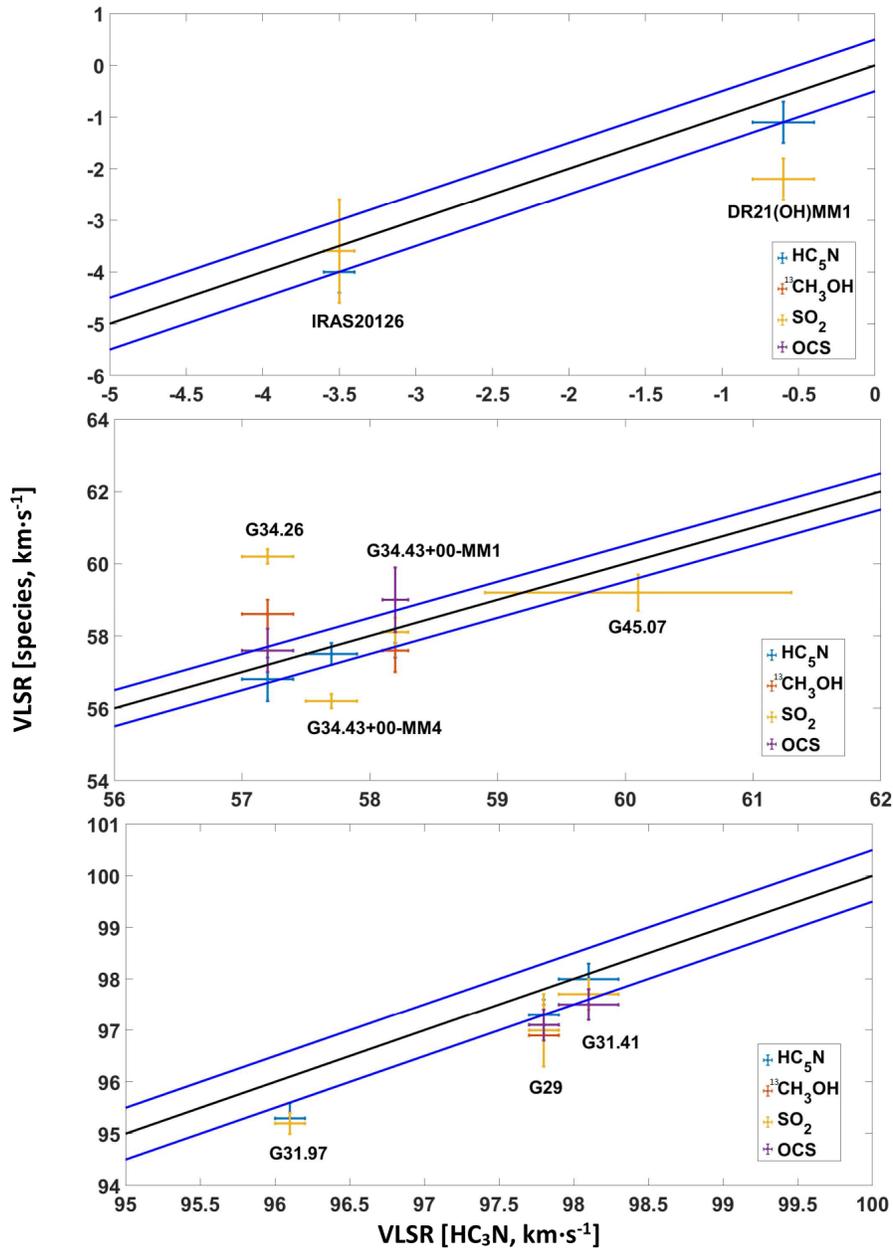


Figura 7.19: Velocidad central de línea para las distintas moléculas detectadas en relación a HC_3N . La línea sólida negra indica un offset de cero, y las azules indican offsets de $\pm 0.5 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. Las barras de error corresponden a incertidumbres 1σ .

según la región más antigua de la curva en la Figura 7.2, principalmente debido a consideraciones de probabilidad de detección. Además, los rangos de edad propuestos y presentados en la Tabla 7.8 son consistentes con el hecho de que las fuentes más antiguas son aquellas que muestran

Capítulo 7. Estimación de edades de núcleos moleculares calientes a partir de observaciones de un solo plato

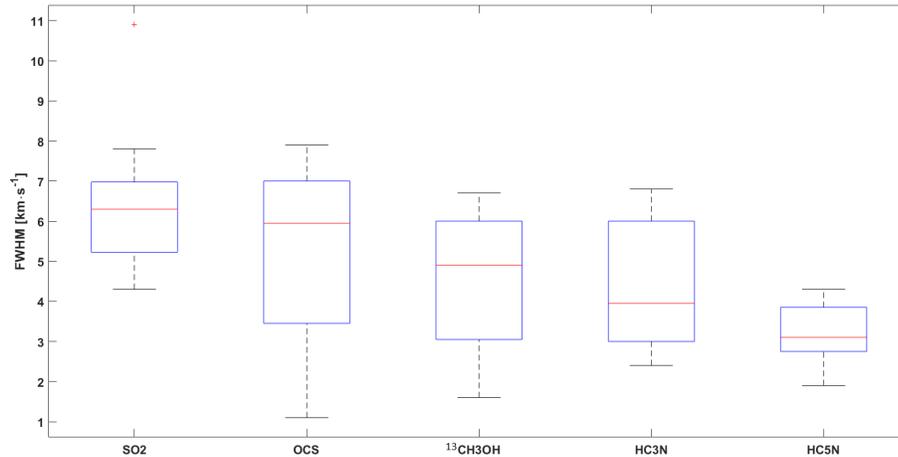


Figura 7.20: Diagrama de Box y Whisker del FWHM de las distintas transiciones moleculares.

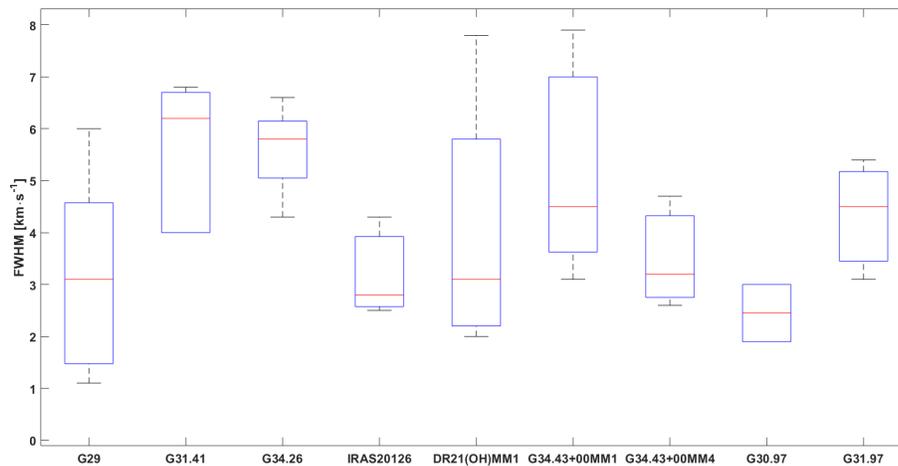


Figura 7.21: Diagrama de Box y Whisker del FWHM de las distintas transiciones moleculares, agrupadas por fuente.

emisión de SO_2 y OCS . Si usáramos la región más joven, entonces IRAS20126 y DR21(OH) se convertirían en las fuentes más antiguas, lo cual es inconsistente con la ausencia de moléculas que contienen azufre.

En el modelo químico de [Chapman et al., 2009] la abundancia de HC_5N comienza a aumentar después de $\sim 10^2$ años, alcanza un máximo alrededor de 10^5 años y disminuye rápidamente en un corto período de tiempo antes de 10^6 años. Esto podría explicar la no detección de HC_5N tanto en G45.07 como en G45.12. Además, la no detección de HC_3N en G45.12 apoya la idea de que esta fuente se encuentra en una etapa más evolucionada que su vecina G45.07, de acuerdo con los otros indicadores mencionados en la Sección 7.4.

Con base en estas consideraciones, distinguimos cuatro grupos de edad para nuestra muestra: HMC *altamente evolucionados* (≥ 500 kyr, que no muestran cianopolinas o solo HC_3N), núcleos *evolucionados* ($\sim 400 - 500$ kyr, que además de cianopolinas muestran OCS), *núcleos jóvenes* ($\sim 350 - 400$ kyr, que muestran cianopolinas y SO_2 pero no OCS) y *núcleos fríos*. En esta clasi-

7.8. Conclusiones

Tabla 7.8: Constreñimiento de edades basado en estimaciones de edad y otros indicadores, tal como se explica en el texto.

Fuente	Tipo	SO ₂	OCS	Clasificación	Edad [10 ³ yr]	Grupo
G29.96–0.02	HMC	X	X	Old	400–450	evolucionado
G31.41+0.31	HMC	X	X	Old	420–450	evolucionado
G34.26+0.15	HMC	X	X	Old	400–490	evolucionado
G45.07+0.13	HMC	X		Old	≥ 10 ^{5.5}	altamente evolucionado
G45.12+0.13	HMC			Old	≥ 10 ^{5.5}	altamente evolucionado
IRAS20126	HMC	X		Old	350–400	HMC joven
DR21(OH)MM1	HMC	X		Old	360–420	HMC joven
G34.43MM1	HMC	X	X	Old	400–440	HMC joven

ficación, G45.12 y G45.07 caen en el grupo altamente evolucionado; G29.96, G31.41, G34.26 y G34.43MM1 pertenecen a la clase central evolucionada; IRAS20126 y DR21(OH)MM1 son núcleos jóvenes y, finalmente, los tres núcleos masivos G34.43MM1, G30.97MM1 y G31.97MM1 pertenecen al grupo de núcleos fríos.

Una consideración importante es que derivamos este grupo de edad en base a observaciones de resolución angular relativamente baja de líneas de energía de baja excitación. Como tal, nuestros datos exploran las condiciones en una escala espacial más grande y en un régimen de densidad/temperatura más bajo que el que se aplica estrictamente a la fase central molecular caliente.

Por otra parte, en [Jaber Al-Edhari et al., 2017] se ajusta un modelo de distribución de energía de línea espectral a un conjunto de detecciones mm y submm de HC₃N y HC₅N en una protoestrella tipo Sol. El modelo considera un "núcleo" caliente (*hot corino*) y una envoltura fría, y se varía los parámetros de abundancia relativa (con respecto a H₂) en el núcleo y en la envoltura, así como la temperatura de polvo que marca la transición a partir de la cual subliman hielos.

Sus resultados muestran que la abundancia de HC₃N es 100 veces mayor en el núcleo que en la envoltura, y para HC₅N es casi un factor de 10 también. Por otra parte, las abundancias de ambas en la envoltura son similares, lo cual por otra parte también ocurre en general en nubes frías (ver Fig. 7 de [Jaber Al-Edhari et al., 2017]). Los autores muestran, además, que la abundancia en la envoltura es dos órdenes de magnitud menor que en nubes frías, lo cual explican por el congelamiento de O y C.

En suma, si estas condiciones son más o menos extrapolables al entorno de un núcleo masivo, podemos suponer que la abundancia fraccional $[X(\text{HC}_5\text{N})/X(\text{HC}_3\text{N})]$ total en nuestro caso es básicamente la abundancia fraccional del núcleo. Esta extrapolación se sustenta en que las abundancias de ambas cianopolinas en el medio interestelar (ISM, por su sigla en inglés) y en las nubes frías en particular es similar entre sí, por lo tanto las diferencias que observamos tienen que ser debidas a diferencias *en el núcleo*, no a diferencias originadas en el envoltorio.

7.8. Conclusiones

Hemos reportado observaciones de un solo plato a ~ 1 cm de una muestra de once fuentes: ocho núcleos moleculares calientes y tres núcleos masivos. Nuestro objetivo principal era buscar cianopolinas (HC_nN, n ≥ 3) para explorar la posibilidad de datar las fuentes mediante los modelos químicos disponibles. Tanto HC₃N como HC₅N mostraron tasas de detección muy altas (91 % y 73 %, respectivamente), lo que nos permitió obtener el ratio de abundancia fraccional o relativa $X[\text{HC}_3\text{N}/\text{HC}_5\text{N}]$ y aplicar el modelo químico descrito en [Chapman et al., 2009], para restringir

Capítulo 7. Estimación de edades de núcleos moleculares calientes a partir de observaciones de un solo plato

las edades de las fuentes. Combinando esta información con consideraciones sobre la detección de SO_2 y OCS , cuyas abundancias también dependen del tiempo, podríamos realizar un esquema de clasificación basado en cuatro grupos: núcleos altamente evolucionados (≥ 500 kyr), núcleos evolucionados ($\sim 400 - 500$ kyr), HMC jóvenes ($\sim 350 - 400$ kyr) y núcleos jóvenes. Un trabajo futuro útil podría ser realizar imágenes de alta resolución (interferométricas) de estas fuentes. Tales observaciones servirían para eliminar la ambigüedad entre el núcleo denso y el núcleo molecular caliente y también para explorar la morfología y cinemática de las primeras etapas de formación de estrellas masivas dentro de estos núcleos.

Capítulo 8

Conclusiones

Los proyectos de reconversión de antenas de telecomunicaciones en desuso en radiotelescopios constituyen una oportunidad única para el desarrollo de la radioastronomía en países con baja o nula experiencia en esta disciplina. Mediante inversiones modestas, es posible disponer de un instrumento científico que aún operando en modo de plato único (*single-dish*) permite obtener resultados científicos relevantes.

En esta tesis he descrito los primeros pasos que se han tomado en el desarrollo de la radioastronomía profesional en el país, a través de la reconversión de alguna de las antenas disponibles en la Estación Terrena de Manga, de ANTEL. La participación en tres de los cuatro Talleres de DRAGN en 2019 permitieron conocer otras experiencias en proyectos de este tipo, y establecer vínculos con grupos e instituciones vinculados a ellos, que han cristalizado en la Iniciativa VLBI de Ibero-América.

A pesar de que el proyecto inicial comprendía la reconversión de la antena 2A (32m), y esta tesis se centraría en la reconversión de dicha antena, hubo que redireccionar esta tesis al ponerse esa iniciativa en stand-by por parte de ANTEL. De todas formas, se logró sistematizar toda la información técnica disponible de las antenas de mayor porte (2A y 3A, de 16.4m) e identificar para cada una las principales tareas de mantenimiento correctivo necesarias para emprender la reconversión de estas antenas en radiotelescopios.

Paralelamente, se emprendieron actividades vinculadas a la reconversión de la antena de Tulancingo (32m), de igual porte que la 2A pero de diseño óptico diferente.

Como el ambiente de RFI a lo largo de la vida útil de un radiotelescopio no es algo estático (los usos del espectro radioeléctrico van cambiando con el desarrollo tecnológico), se impone la necesidad de monitorear permanentemente el ambiente de RFI en un radioobservatorio. El primer resultado de las actividades desarrolladas para el proyecto de Tulancingo es una estación de medición de RFI basada en un analizador de espectro de amplio rango (DC-18 GHz) programable, a ser instalada en Tulancingo para monitorear de forma permanente el ambiente de RFI del radioobservatorio.

Se desarrolló también un espectrómetro y un radiómetro basados en un único SDR, para ser utilizados como primer prototipo de *back-end* del receptor en banda L de la antena de Tulancingo, lo que permitió además adquirir habilidades básicas de programación de SDR en gnu-radio. Estos prototipos también pueden ser utilizados como *back-end* de un receptor en banda L para alguna de las antenas de gran porte de la ETM, o para frecuencias más altas si se incorpora una etapa heterodina previa.

Luego, a partir del diseño, construcción y operación de un radiómetro de bajo costo, he demostrado cómo es posible, aún sin disponer de un presupuesto inicial relevante, llevar a cabo actividades que tienen un doble valor para un proyecto de reconversión. Por un lado, al instalarlo y utilizarlo como *back-end* de una antena de pequeño porte (4.2m) permitió generar información

Capítulo 8. Conclusiones

y productos que serán fácilmente extrapolables a su uso con las antenas de mayor porte (3A o 2A). Tal es el caso de la metodología utilizada para obtener un modelo de apuntamiento. Incluso, en el caso de las antenas de mayor porte, por tratarse de antenas más sensibles, será posible ampliar el rango de posiciones utilizado para construir los modelos de apuntamiento con fuentes que no fue posible detectar con la antena de menor porte. Los tránsitos detectados de la Luna y el Sol sentaron también las bases para poder modelar el patrón de radiación de una antena a partir de tránsitos de fuentes puntuales, con las antenas de mayor porte. Asimismo, las mediciones realizadas con la antena 106 evidenciaron la notable diferencia en el ambiente de RFI entre las bandas C y Ku, principalmente debido a las interferencias de 5G en la banda de 3.5 GHz.

Por otro lado, constituyeron actividades con un altísimo valor formativo que permite adquirir las habilidades y conocimientos necesarios para agilizar el proceso de reconversión "real". Dado el estado de la antena 106, su versatilidad por disponer de dos receptores y sobre todo libertad de movimiento en ambos ejes, constituye un excelente banco de pruebas y por ello será utilizada como instrumento para realización de prácticas en un probable curso de grado de introducción a la radioastronomía.

Desde el punto de vista de la obtención y análisis de datos radioastronómicos con valor científico, que complementan las actividades anteriormente descritas cuyo carácter es más bien ingenieril o técnico, he reportado observaciones, realizadas por terceros, de un solo plato a ~ 1 cm de una muestra de once fuentes: ocho núcleos moleculares calientes y tres núcleos masivos. El objetivo inicial principal de este relevamiento era buscar cianopolinas (HC_nN , $n \geq 3$) para explorar la posibilidad de datar las fuentes mediante diagramas rotacionales (descritos en el marco teórico del Capítulo 2) y modelos químicos disponibles.

Tanto HC_3N como HC_5N mostraron tasas de detección muy altas (91 % y 73 %, respectivamente). Esto nos permitió obtener el ratio de abundancia fraccional o relativa $X[\text{HC}_3\text{N}/\text{HC}_5\text{N}]$ y aplicar el modelo químico descrito en [Chapman et al., 2009], para restringir las edades de las fuentes. Combinando esta información con consideraciones sobre la detección de SO_2 y OCS , cuyas abundancias también dependen del tiempo, realizamos un esquema de clasificación basado en cuatro grupos: núcleos altamente evolucionados (≥ 500 kyr), núcleos evolucionados ($\sim 400 - 500$ kyr), HMC jóvenes ($\sim 350 - 400$ kyr) y núcleos jóvenes. Un trabajo futuro útil podría ser realizar imágenes de alta resolución (interferométricas) de estas fuentes. Tales observaciones servirían para eliminar la ambigüedad entre el núcleo denso y el núcleo molecular caliente y también para explorar la morfología y cinemática de las primeras etapas de formación de estrellas masivas dentro de estos núcleos.

En suma, se han sentado las bases de un desarrollo autóctono de la radioastronomía profesional, y como perspectivas inmediatas de trabajo y líneas de investigación destacamos dos. En primer lugar, incorporar un control por software de la antena 106 que permita moverla de forma remota y realizar pruebas sin necesidad de trasladarse a la Estación Terrena. Esto facilitará enormemente su uso tanto como instrumento de formación, para realizar las prácticas de forma remota, como para explorar más en profundidad las posibilidades de utilizar esta antena para monitoreo de destellos de máseres de metanol en 12 GHz. En segundo lugar, agregar al radiómetro diseñado el ADC de 16 bit, para mayor resolución que la actual (10 bit).

A corto o mediano plazo, en lo que respecta a la 3A, una reconversión completa implica la reparación de la mecánica del tornillo de elevación, sistema de control para apuntamiento y tracking, y un receptor nuevo, sea centrado en 6.7GHz, sea de 4-8 GHz. Las posibilidades científicas de la antena reconvertida de esta forma se centrarían en una primera instancia en el monitoreo de máseres de metanol en 6.7GHz. La reconversión completa de la 2A implica una inversión mayor, sin embargo, vale la pena explorar un diseño inicial de foco primario como etapa intermedia, que evite la construcción e instalación de un subreflector.

Apéndice A

Archivo de configuración del
receptor CRFS RFEye Node 100-18

Apéndice A. Archivo de configuración del receptor CRFS RFEye Node 100-18

```
# Simple example RFeye Logger Configuration File (rfeyed.cfg)
# See RFeye Node User Guide for more examples

# Define general configuration parameters
[config]

# Set maximum file size to 10 MB
max_file_size = 10000000

# Set Data directory to 'data' subdirectory on USB1
data_dir1 = "/media/USB/data1"
data_dir2 = "/media/USB/data2"

# Define descriptive text to be incorporated in output files
unit_info = "Sample Config"

# Define output streams
[streams]

# Define Stream 'a' as http on default port
a = http

# Define Stream 'b' as output to data file on memory stick with
# filename including unit ID, date and time
b = file,"%(data_dir1)s/%(date)s/%(time)s.bin"
c = file,"%(data_dir2)s/%(date)s/%(time)s.bin"

# Define a run timer block
[run timer 1]

# Set timer interval to 1 second
timer = 1 sec

# Define the first run scan block
[run scan 0]

# Define the scan: every 100ms, Input 1, 88-1000 MHz, 200 kHz bin
# size (unit will select nearest usable value), 1 FFT measurement
# per scan
scan = 1000 ms,1,88,1000,400,1

# Write out peak information for each scan (i.e. scan itself)
peak0 = 10, ab, 10 scans,"Instantaneous peak 88- 1000MHz"

# Define the first run scan block
[run scan 1]

# Define the scan: every 100ms, Input 2, 2000-7000 MHz, 1000 kHz
# bin
# size (unit will select nearest usable value), 1 FFT measurement
# per scan
scan = 1000 ms,2,2000,7000,2000,1

# Write out peak information for each scan (i.e. scan itself)
peak1 = 10, ac, 10 scans,"Instantaneous peak 2000 - 7000MHz"
```

Figura A.1

Apéndice B

Diagrama de bloques del ACU de 3A

El diagrama fue obtenido del manual del fabricante.

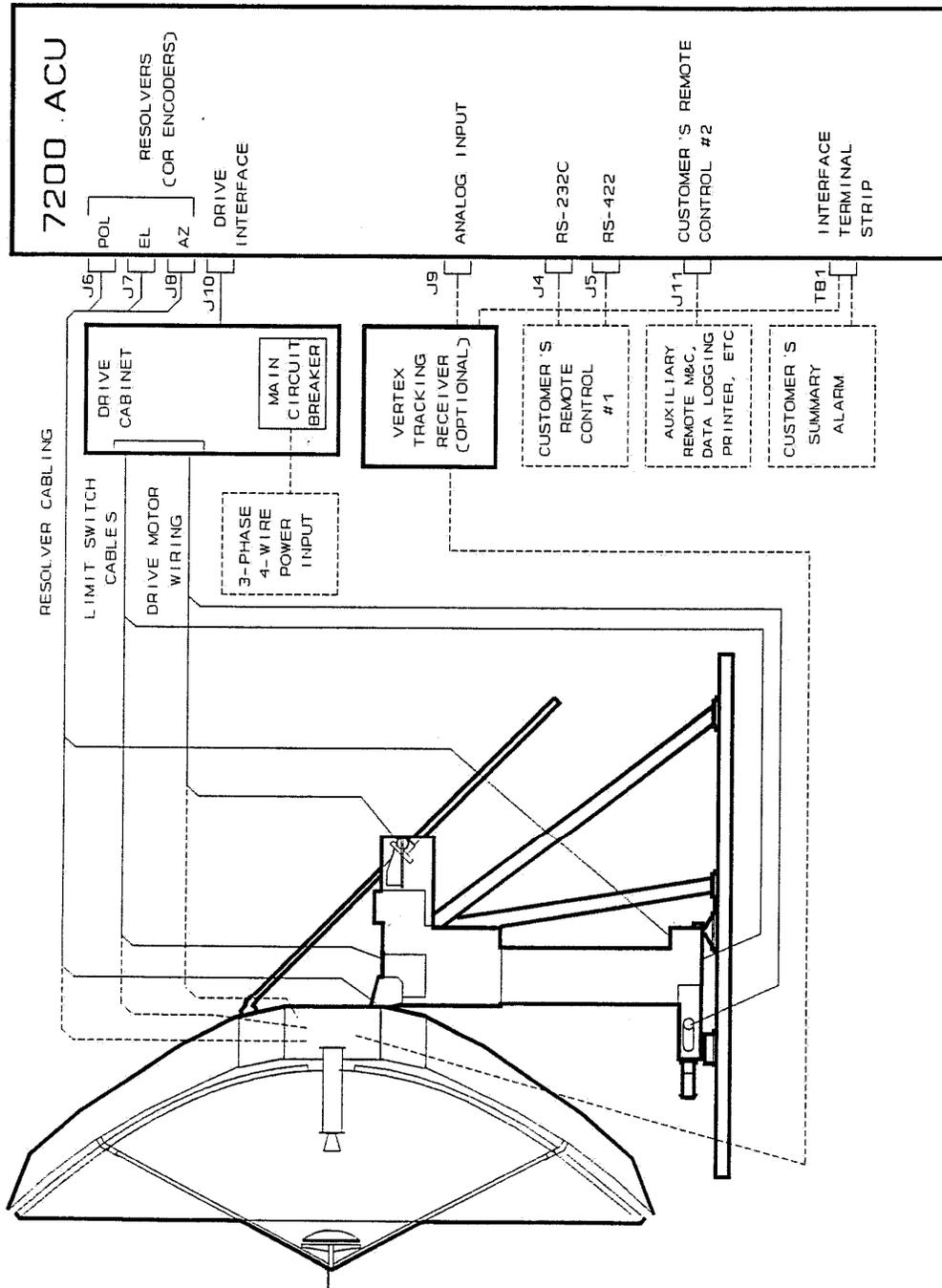


Figura B.1

Figure 2-1 7200 ACS Block Diagram

Apéndice C

Proyecto Ejecutivo de Reconversión de la Antena 2A

En este Anexo se presenta un fragmento del documento "Proyecto de Reconversión de la Antena 2A de la Estación Terrena de Manga en un radiotelescopio - El primer paso de Uruguay hacia la radioastronomía profesional".

Constituye la parte sustancial del proyecto ejecutivo de reconversión de la antena 2A, elaborado por el autor junto a Jorge Gallo y Ricardo Rezano (ANTEL), Gonzalo Tancredi (FCIEN) y el consultor externo Rod Hine (Reino Unido).

Este proyecto fue presentado a las autoridades de ANTEL en 2019.

C.1. Descripción general

Se propone reconvertir la antena 2A de la Estación Terrena de Manga en un radiotelescopio, con el objetivo de impulsar el desarrollo de la radioastronomía en el Uruguay y posibilitar una progresiva incorporación del país en comunidades, proyectos o iniciativas de escala global y de punta (SKA, EVN, y fundamentalmente IVIA). Todo ello posibilitaría a su vez el desarrollo de capacidades locales en diversas áreas y sub áreas de la ingeniería (sistemas, en particular manejo de big data, ingeniería de RF, electrónica, ingeniería de antenas, civil, entre otras) y la ciencia (astronomía, y quizá geodesia). Se propone subdividir el proceso de reconversión en cuatro fases:

FASE 0: En esta fase se deberá lograr recuperar el movimiento de elevación de la antena, que se ha visto atascado debido a la gran cantidad de años de desuso, tarea que insumirá el armado de una plataforma apropiada, el reemplazo en el sistema hidráulico de bomba cañerías sellos y aceite y la limpieza y pulido del tornillo de elevación y su cubierta, así como su rearmado y prueba posterior. Esta fase cero es considerada clave para tomar la decisión de seguir o no el proyecto pues la falta de movilidad vertical de la antena, impide su uso para apuntamiento en la esfera celeste que es imprescindible para las siguientes fases del proyecto: lo hace factible o no.

FASE 1: Reconversión básica al final de la cual se tendrá un radiotelescopio con control moderno de motores (servomotores controlados por PLC), receptor a temperatura ambiente centrado en 6.7 GHz, y cobertura acimutal limitada a la actual (-35° a $+140^\circ$ NESO).

FASE 2: Durante esta fase se incorporará un criostato al receptor de 6.7 GHz a los efectos de bajar el piso de ruido térmico, y se realizará la obra civil necesaria para extender la cobertura acimutal (idealmente a $\pm 270^\circ$), incluyendo la extensión del riel de la base y el cableado necesario para lograr ese movimiento.

FASE 3: Estación VLBI: Al final de esta fase se tendrá una estación VLBI, al incorporar un máser de hidrógeno como referencia de tiempo (frecuencia) y un DBBC (Digital Base Band

Apéndice C. Proyecto Ejecutivo de Reconversión de la Antena 2A

Converter).

C.2. Presupuesto

Como parte de un proyecto en el que Antel está involucrado desde el momento que está indicado como uno de los actores para el logro del objetivo III Meta 16 de la Agenda Digital 2020, se identifica la oportunidad de aportar infraestructura e instalaciones, así como personal técnico. Para que esta infraestructura este en óptimas condiciones para ser utilizada en forma básica como radiotelescopio, es necesario superar con éxito la fase cero, y completar la fase uno. Hay además ciertos requisitos de seguridad que deben garantizarse, por ello, será necesario elaborar un convenio entre los actores nacionales participantes antes del comienzo de la primer fase. Conjuntamente será necesario un reglamento de participación debido al uso combinado de instalaciones del RT en lugares sensibles de equipamientos de comunicaciones satelitales.

La Figura C.1 sintetiza los presupuestos de las fases 0 a 3. A continuación se presentan los presupuestos en detalle de cada fase.

C.2.1. Fase 0

El detalle de las tareas que es preciso llevar a cabo durante la Fase 0 del proyecto, al final de la cual se habrá determinado si la reconversión es factible o no, se detalla en la tabla de la Figura C.2.

C.2.2. Fase 1

Las tareas incluidas en esta Fase se detallan en la tabla de la Figura C.2.

Se estima una duración de 1.5 años ya que es preciso que en todo el proceso se tenga en cuenta el objetivo estratégico del proyecto, esto es, contribuir al desarrollo científico-tecnológico del país y maximizar la participación de industria local de punta. En este sentido, previo a comenzar la ejecución, se identificará aquellas tareas que serán realizadas en el marco de proyectos de fin de carrera, tesis de maestría, sin comprometer el plazo planteado.

El tiempo después de la Obra que se plantea para toda esta Fase se dedicará a la formación científica en radioastronomía, por lo que el instrumento tendrá en esta primera Fase un uso enfocado en el entrenamiento. No obstante ello, se podrá hacer un uso científico ya en esta Fase, en particular el monitoreo de máseres (brillantes) de metanol.

C.2.3. Fase 2

Durante la Fase 2 se propone ejecutar las tareas detalladas en la tabla de la Figura C.4.

Durante esta Fase continuará la formación de personal en particular en teoría y operación del telescopio integrado a una red VLBI. El uso científico se potencia en esta Fase con la extensión de la cobertura acimutal (lo que posibilita el seguimiento de objetos celestes por más tiempo), y la detección aún de máseres débiles gracias a las temperaturas criogénicas del receptor.

C.2.4. Fase 3

La última Fase del proyecto comprende la adquisición e instalación de la infraestructura necesaria para que el radiotelescopio pueda incorporarse a una red VLBI: máser de hidrógeno para obtener la referencia de frecuencia (tiempo) necesaria en esta técnica, y el conversor digital a banda base (DBBC).

Debido a que el recinto donde se alberga el máser tiene requerimientos muy exigentes en cuanto a estabilidad mecánica y térmica, se incorpora un ítem de instalación que es comparable al propio instrumento.

C.2. Presupuesto

FASE	Hito	Monto [US\$]	Duración obra [años]	Duración fase [años]
0 – Comprobación del funcionamiento del movimiento de elevación	Se trata reparar el sistema de elevación (la dificultad implica que de no ser posible lograrlo cancela el resto del proyecto)	20K	0,5	0,5
1 – Reconversión básica	Radiotelescopio con sistema de control moderno, Rx @ 6.7 GHz (T amb.), cobertura acimutal limitada.	245 k	2	4
2- Ampliación I	Radiotelescopio con sistema de control moderno, Rx @ 6.7 GHz con cryostato, cobertura acimutal total.	500 k	1	2
3- Ampliación II y Desarrollo	Estación VLBI @ 6.7 GHz.	500 k	1	1

Figura C.1: Presupuesto general

Apéndice C. Proyecto Ejecutivo de Reconversión de la Antena 2A

Tarea	Monto estimado [US\$]
I. Mantenimiento correctivo	
1. Elevación	
a. Tornillo de elevación	
b. Reemplazo bomba lubricación	
c. Reemplazo filtros	
d. Llenado aceite	
	20.000

Figura C.2: Tareas y presupuesto de Fase 0.

A partir de la instalación de esta infraestructura, y teniendo al final de esta obra personal capacitado en la operación y uso científico de una estación VLBI, comienza la vida útil científica de todo el instrumento, estimada en 10 años (o 14 contando desde el inicio del proyecto), aunque posiblemente se extienda más allá de este período.

Durante la Fase 3 adquiere mayor relevancia el trabajo de análisis detallado de los datos transmitidos y almacenados, donde cobran una importancia relevante las tecnologías de Big Data, las capacidades que se puedan dedicar en los Data Centers y de vínculos por fibra óptica submarina. Aquí naturalmente vuelve a tener participación relevante lo que se pueda apoyar desde Antel.

C.3. Cronograma

El cuadro de la Figura C.6 es un esquema del cronograma tentativo de las cuatro fases, subdividido en años (1 a 15). La fase 0 comprende medio año, como ya se señaló.

C.4. Conclusiones

La iniciativa propuesta se enmarca dentro del Objetivo III “Inversión estratégica en infraestructura” de la Agenda Digital Uruguay 2020, cuya meta número 16 establece: “Diseñar, instalar y operar un radiotelescopio de diseño innovador y relativo bajo costo, a instalarse en el territorio nacional, que facilitará, entre otros, el tratamiento de grandes volúmenes de datos y el desarrollo de industria local de punta”.

Para el éxito de la misma es necesario superar la fase 0 de comprobación de funcionamiento del sistema de elevación a tornillo que significa una erogación de unos US\$ 20.000 en el correr de 2019. Según el resultado de esta fase se da o no entonces la posibilidad de seguir adelante con el proyecto, donde Antel podría colaborar además con la fase 1 consistente en una inversión de US\$ 245.000 luego de la cual la antena 2A quedaría pronta en forma básica como instrumento de observación espacial. El disponer de un instrumento tal facilitará así el acceso a fuentes de financiamiento local (ANII) e internacional para abordar las fases 2 y 3 de la presente propuesta.

Este proyecto significaría el comienzo del desarrollo de capacidades nacionales, tanto a nivel

Tarea	Monto estimado [US\$]
I. Mantenimiento correctivo	
1. Reflector Principal	
a. Instalación de 10 paneles faltantes	
	5.000
2. Subreflector	
a. Obtener perfil	
b. Construir	
c. Instalar	
	20.000
3. Acondicionamiento estructura	
a. Tratamiento <u>anti óxido</u>	
b. Pintura	
	150.000
II. Control	
1. Instalación motores servo en lugar de aux. drive	10.000
2. Instalación de controladores var de vel p slew	4.000
3. Instalación de PLC, cableado	16.000
4. Acondicionamiento de container	10.000
	40.000
III. Receptor	
1. Receptor Tamb 6.7 GHz	15.000
2. OMT	2.500
3. Digital backend	2.500
	20.000
IV. Acondicionamiento de cuarto superior	10.000
TOTAL	245.000

Figura C.3: Tareas y presupuesto de Fase 1.

Apéndice C. Proyecto Ejecutivo de Reconversión de la Antena 2A

Tarea	Monto estimado [US\$]
I. Cobertura acimutal total	
1. Obra civil	
2. Riel	
	400.000
II. Criostato	100.000
TOTAL	500.000

Figura C.4: Tareas y presupuesto de Fase 2.

Tarea	Monto estimado [US\$]
I. Máser hidrógeno	
1. Equipo	250.000
2. Instalación	200.000
II. DBBC	100.000
TOTAL	550.000

Figura C.5: Tareas y presupuesto de Fase 3.

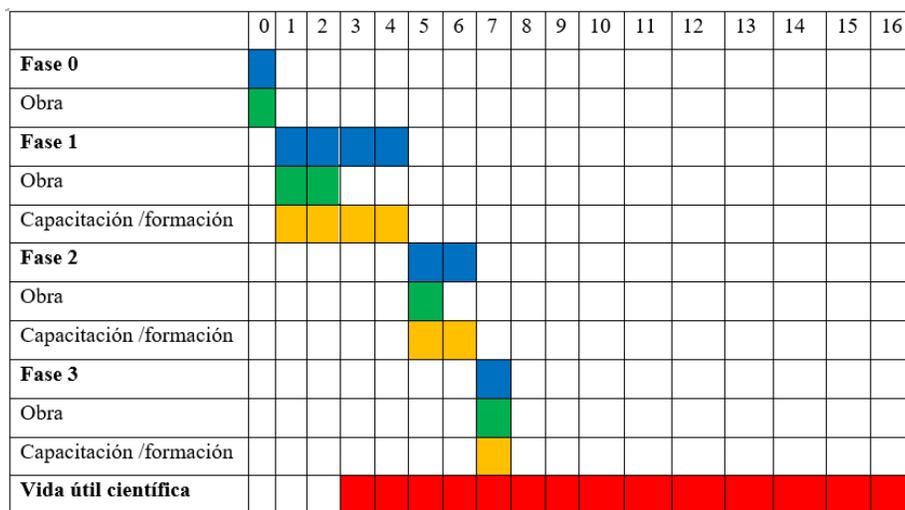


Figura C.6: Cronograma tentativo del Proyecto.

C.4. Conclusiones

académico como industrial, en todas las áreas de la ingeniería que están vinculadas a la construcción, operación y mantenimiento de un radio observatorio.

Por ello, constituiría un verdadero polo de desarrollo científico tecnológico de vanguardia en el país, que permitiría además formar parte de redes globales con la participación de instituciones líder a nivel mundial en la materia, y permitiría posicionar al país a través de la infraestructura que ofrece Antel (Data Centers, cable submarino de FO) en el centro de una red latinoamericana de VLBI.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Apéndice D

Parámetros de ajustes a
transiciones detectadas en HMC

Apéndice D. Parámetros de ajustes a transiciones detectadas en HMC

Tabla D.1: Parámetros de ajustes gaussianos a líneas detectadas en HMCs.*

Fuente	Molécula	Transición	V_{LSR} [km·s ⁻¹]	$\int T_{mb} dv$ [K·km·s ⁻¹]	T_{mb} [K]	FWHM [km·s ⁻¹]	σ_{rms} [mK]
G29.96	HC ₅ N	(11-10)	97.3 (3)	0.42 (12)	0.13 (3)	3.1 (8)	14
	¹³ CH ₃ OH	30(7,24)-31(6,25)	96.9 (6)	0.11 (13)	0.06 (5)	1.6 (14)	
	SO ₂	(4 ₀ -3 ₀)	97.0 (7)	0.6 (2)	0.09 (2)	6.0 (16)	
	HC ₃ N	J=4-3, F=5-4	97.8 (1)	8.3 (6)	1.9 (1)	4.1 (3)	
	OCS	15(2,13)-15(2,14)	97.1 (3)	0.3 (3)	0.28 (15)	1.1 (7) ¹	
G31.41	HC ₅ N	(11-10)	98.0 (3)	0.67 (14)	0.16 (3)	4.0 (8)	17
	¹³ CH ₃ OH	30(7,24)-31(6,25)	97.5 (3)	1.8 (2)	0.25 (2)	6.7 (6)	
	SO ₂	(4 ₀ -3 ₀)	97.7 (3)	2.0 (2)	0.30 (2)	6.3 (6)	
	HC ₃ N	J=4-3, F=5-4	98.1 (2)	15.4 (8)	2.1 (1)	6.8 (4)	
	OCS	15(2,13)-15(2,14)	97.5 (3)	4.1 (6)	0.64 (7)	6.1 (8)	
G34.26	HC ₅ N	(11-10)	56.8 (6)	0.36 (12)	0.08 (2)	4.3 (14)	19
	¹³ CH ₃ OH	30(7,24)-31(6,25)	58.6 (4)	0.66 (12)	0.12 (2)	5.3 (9)	
	SO ₂	(4 ₀ -3 ₀)	60.2 (2)	3.4 (3)	0.49 (3)	6.6 (5)	
	HC ₃ N	J=4-3, F=5-4	57.2 (2)	9.1 (9)	1.4 (1)	6.0 (6)	
	OCS	15(2,13)-15(2,14)	57.6 (6)	2.8 (7)	0.46 (9)	5.8 (14)	
G45.07	HC ₅ N	(11-10)	ND	ND	ND	ND	10
	¹³ CH ₃ OH	30(7,24)-31(6,25)	ND	ND	ND	ND	
	SO ₂	(4 ₀ -3 ₀)	59.2 (5)	1.8 (2)	0.16 (2)	10.9 (13)	
	HC ₃ N	J=4-3, F=5-4	60.1 (12)	1.9 (9)	0.3 (1)	6.8 (29)	
	OCS	15(2,13)-15(2,14)	ND	ND	ND	ND	
G45.12	HC ₅ N	(11-10)	ND	ND	ND	ND	10
	¹³ CH ₃ OH	30(7,24)-31(6,25)	ND	ND	ND	ND	
	SO ₂	(4 ₀ -3 ₀)	ND	ND	ND	ND	
	HC ₃ N	J=4-3, F=5-4	ND	ND	ND	ND	
	OCS	15(2,13)-15(2,14)	ND	ND	ND	ND	
IRAS20126	HC ₅ N	(11-10)	-4.0 (4)	0.46 (9)	0.15 (2)	2.8 (6)	8
	¹³ CH ₃ OH	30(7,24)-31(6,25)	ND	ND	ND	ND	
	SO ₂	(4 ₀ -3 ₀)	-3.6 (10)	0.3 (2)	0.07 (3)	4.3 (26)	
	HC ₃ N	J=4-3, F=5-4	-3.5 (1)	4.5 (4)	1.7 (1)	2.5 (2)	
	OCS	15(2,13)-15(2,14)	ND	ND	ND	ND	
DR21(OH)MM1	HC ₅ N	(11-10)	-1.1 (4)	0.40 (9)	0.10 (2)	3.8 (8)	9
	¹³ CH ₃ OH	30(7,24)-31(6,25)	ND	ND	ND	ND	
	SO ₂	(4 ₀ -3 ₀)	-2.2 (4)	1.6 (2)	0.19 (2)	7.8 (9)	
	HC ₃ N	J=4-3, F=5-4	-0.6 (2)	5.1 (8)	2.0 (3)	2.4 (4)	
	OCS	15(2,13)-15(2,14)	ND	ND	ND	ND	
G34.43MM1	HC ₅ N	(11-10)	57.6 (2)	0.62 (11)	0.19 (3)	3.1 (5)	13
	¹³ CH ₃ OH	30(7,24)-31(6,25)	57.6 (6)	0.39 (12)	0.08 (2)	4.5 (13)	
	SO ₂	(4 ₀ -3 ₀)	58.1 (4)	1.4 (2)	0.2 (2)	6.7 (9)	
	HC ₃ N	J=4-3, F=5-4	58.2 (1)	11.1 (8)	2.7 (2)	3.8 (3)	
	OCS	15(2,13)-15(2,14)	59.0 (9)	2.1 (6)	0.25 (6)	7.9 (22)	
G34.43MM4	HC ₅ N	(11-10)	57.5 (3)	0.30 (8)	0.11 (3)	2.6 (7)	12
	¹³ CH ₃ OH	30(7,24)-31(6,25)	ND	ND	ND	ND	
	SO ₂	(4 ₀ -3 ₀)	56.2 (2)	1.01 (13)	0.20 (2)	4.7 (6)	
	HC ₃ N	J=4-3, F=5-4	57.7 (2)	5.0 (6)	1.5 (2)	3.2 (4)	
	OCS	15(2,13)-15(2,14)	ND	ND	ND	ND	
G30.97MM1	HC ₅ N	(11-10)	77.5 (3)	0.25 (10)	0.12 (4)	1.9 (7)	13
	¹³ CH ₃ OH	30(7,24)-31(6,25)	ND	ND	ND	ND	
	SO ₂	(4 ₀ -3 ₀)	ND	ND	ND	ND	
	HC ₃ N	J=4-3, F=5-4	77.9 (1)	4.0 (5)	1.3 (1)	3.0 (3)	
	OCS	15(2,13)-15(2,14)	ND	ND	ND	ND	
G31.97MM1	HC ₅ N	(11-10)	95.3 (3)	0.49 (13)	0.15 (3)	3.1 (8)	16
	¹³ CH ₃ OH	30(7,24)-31(6,25)	ND	ND	ND	ND	
	SO ₂	(4 ₀ -3 ₀)	95.2 (2)	2.1 (2)	0.36 (3)	5.4 (5)	
	HC ₃ N	J=4-3, F=5-4	96.1 (1)	10.4 (7)	2.2 (1)	4.5 (3)	
	OCS	15(2,13)-15(2,14)	ND	ND	ND	ND	

* Las incertidumbres 2σ se indican entre paréntesis en unidades de menor cifra significativa (por ejemplo 97.3 (3) significa 97.3 ± 0.3). ⁽¹⁾Esta línea debería tomarse con cautela, pues la transición fue apenas detectada ($T_{mb} \sim 3\sigma$).

Referencias

- [Aalto et al., 2009] Aalto, S., Wilner, D., Spaans, M., Wiedner, M. C., Sakamoto, K., Black, J. H., and Caldas, M. (2009). High-resolution HNC 3-2 SMA observations of Arp 220. *Astronomy and Astrophysics*, 493(2):481–487.
- [Akeson and Carlstrom, 1996] Akeson, R. L. and Carlstrom, J. E. (1996). Lifetimes of Ultra-compact H II Regions: High-Resolution Methyl Cyanide Observations. *Astrophysical Journal*, 470:528.
- [An et al., 2017] An, T., Chen, X., Mohan, P., and Lao, B. Q. (2017). Radio Frequency Interference Mitigation. *Acta Astronomica Sinica*, 58(5):43.
- [Applied Telecommunications, 1997] Applied Telecommunications, I. (1997). 1:2 Redundant LNA/LNB system for ANTEL 16.4m Intelsat Standard A Station. Technical Report 950604, Applied Telecommunications, Inc.
- [Araya et al., 2005] Araya, E., Hofner, P., Kurtz, S., Bronfman, L., and DeDeo, S. (2005). CH₃CN Observations toward Southern Massive Star-forming Regions. *Astrophysical Journal, Supplement*, 157(2):279–301.
- [Araya et al., 2009] Araya, E. D., Kurtz, S., Hofner, P., and Linz, H. (2009). Radio Continuum and Methanol Observations of DR21(OH). *Astrophysical Journal*, 698(2):1321–1329.
- [Battye et al., 2013] Battye, R. A., Browne, I. W. A., Dickinson, C., Heron, G., Maffei, B., and Pourtsidou, A. (2013). H I intensity mapping: a single dish approach. *Monthly Notices of the RAS*, 434(2):1239–1256.
- [Beltrán et al., 2011] Beltrán, M. T., Cesaroni, R., Neri, R., and Codella, C. (2011). Rotating toroids in G10.62-0.38, G19.61-0.23, and G29.96-0.02. *Astronomy and Astrophysics*, 525:A151.
- [Beltrán et al., 2018] Beltrán, M. T., Cesaroni, R., Rivilla, V. M., Sánchez-Monge, Á., Moscadelli, L., Ahmadi, A., Allen, V., Beuther, H., Etoke, S., Galli, D., Galván-Madrid, R., Goddi, C., Johnston, K. G., Klaassen, P. D., Kölligan, A., Kuiper, R., Kumar, M. S. N., Maud, L. T., Mottram, J. C., Peters, T., Schilke, P., Testi, L., van der Tak, F., and Walmsley, C. M. (2018). Accelerating infall and rotational spin-up in the hot molecular core G31.41+0.31. *Astronomy and Astrophysics*, 615:A141.
- [Beltrán et al., 2019] Beltrán, M. T., Padovani, M., Girart, J. M., Galli, D., Cesaroni, R., Paladino, R., Anglada, G., Estalella, R., Osorio, M., Rao, R., Sánchez-Monge, Á., and Zhang, Q. (2019). ALMA resolves the hourglass magnetic field in G31.41+0.31. *Astronomy and Astrophysics*, 630:A54.
- [Benjamin et al., 2003] Benjamin, R. A., Churchwell, E., Babler, B. L., Bania, T. M., Clemens, D. P., Cohen, M., Dickey, J. M., Indebetouw, R., Jackson, J. M., Kobulnicky, H. A., Lazarian, A., Marston, A. P., Mathis, J. S., Meade, M. R., Seager, S., Stolovy, S. R., Watson, C., Whitney, B. A., Wolff, M. J., and Wolfire, M. G. (2003). GLIMPSE. I. An SIRTf Legacy Project to Map the Inner Galaxy. *Publications of the ASP*, 115(810):953–964.

Referencias

- [Bentum et al., 2010] Bentum, M., Boonstra, A. J., and Millenaar, R. (2010). Assessment of RFI measurements for LOFAR. In *RFI Mitigation Workshop*, page 6.
- [Bhat et al., 2005] Bhat, N. D. R., Cordes, J. M., Chatterjee, S., and Lazio, T. J. W. (2005). Radio frequency interference identification and mitigation using simultaneous dual-station observations. *Radio Science*, 40(5):RS5S14.
- [Calcutt et al., 2014] Calcutt, H., Viti, S., Codella, C., Beltrán, M. T., Fontani, F., and Woods, P. M. (2014). A high-resolution study of complex organic molecules in hot cores. *Monthly Notices of the RAS*, 443(4):3157–3173.
- [Cernuschi et al., 1968] Cernuschi, F., Codina, S., and Herrero, V. (1968). Possible Correlation Between Type IVc Bursts and the Area of the Simultaneous Largest Sun SPOT Group. *The Astronomical Journal Supplement*, 73:58.
- [Cesaroni et al., 2011] Cesaroni, R., Beltrán, M. T., Zhang, Q., Beuther, H., and Fallscheer, C. (2011). Dissecting a hot molecular core: the case of G31.41+0.31. *Astronomy and Astrophysics*, 533:A73.
- [Cesaroni et al., 1994a] Cesaroni, R., Churchwell, E., Hofner, P., Walmsley, C. M., and Kurtz, S. (1994a). Hot ammonia towards compact HII regions. *Astronomy and Astrophysics*, 288:903–920.
- [Cesaroni et al., 2010] Cesaroni, R., Hofner, P., Araya, E., and Kurtz, S. (2010). The structure of hot molecular cores over 1000 AU. *Astronomy and Astrophysics*, 509:A50.
- [Cesaroni et al., 1994b] Cesaroni, R., Olmi, L., Walmsley, C. M., Churchwell, E., and Hofner, P. (1994b). A Massive Young Embedded Object Associated with the UC H II Region G31.41+0.31. *Astrophysical Journal, Letters*, 435:L137.
- [Cesaroni et al., 1992] Cesaroni, R., Walmsley, C. M., and Churchwell, E. (1992). Hot ammonia toward ultracompact HII regions. *Astronomy and Astrophysics*, 256:618–630.
- [Chambers et al., 2009] Chambers, E. T., Jackson, J. M., Rathborne, J. M., and Simon, R. (2009). Star Formation Activity of Cores within Infrared Dark Clouds. *Astrophysical Journal, Supplement*, 181(2):360–390.
- [Chapman et al., 2009] Chapman, J. F., Millar, T. J., Wardle, M., Burton, M. G., and Walsh, A. J. (2009). Cyanopolynes in hot cores: modelling G305.2+0.2. *Monthly Notices of the RAS*, 394(1):221–230.
- [Churchwell et al., 1992] Churchwell, E., Walmsley, C. M., and Wood, D. O. S. (1992). Hot, dense, molecular gas associated with ultracompact HII regions. *Astronomy and Astrophysics*, 253:541–556.
- [Colomer, 2019] Colomer, F. (2019). JIVE - VLBI techniques. Accessed: 2024-03-11.
- [CRFS, 2018] CRFS (2018). Rfeye node file storage specification. Technical report. CR-002421-TN-1.
- [Das et al., 2000] Das, T. K., Sarkar, H., and Sen, A. K. (2000). The Ratio of the radio and optical diameters of the sun at centimeter wavelengths. *Solar Physics*, 194(1):155–163.
- [De Buizer et al., 2005] De Buizer, J. M., Osorio, M., and Calvet, N. (2005). Observations and Modeling of the 2-25 μm Emission from High-Mass Protostellar Object Candidates. *Astrophysical Journal*, 635(1):452–465.
- [Duah Asabere et al., 2015] Duah Asabere, B., Gaylard, M., Horellou, C., Winkler, H., and Jarrett, T. (2015). Radio astronomy in Africa: the case of Ghana. *arXiv e-prints*, page arXiv:1503.08850.
- [Estalella and Anglada, 1999] Estalella, R. and Anglada, G. (1999). *Introducción a la Física del Medio Interestelar*. Edicions UB: Barcelona.

- [Fukuzawa et al., 1998] Fukuzawa, K., Osamura, Y., and Schaefer, Henry F., I. (1998). Are Neutral-Neutral Reactions Effective for the Carbon-Chain Growth of Cyanopolynes and Polyacetylenes in Interstellar Space? *505(1):278–285*.
- [Gale D., 2019] Gale D. (2019). Dish Metrology and Surface Accuracy Measurements: In the context of old dishes. Accessed: 2024-03-07.
- [Gaume and Mutel, 1987] Gaume, R. A. and Mutel, R. L. (1987). A Study of the Ground-State Hydroxyl Maser Emission Associated with 11 Regions of Star Formation. *Astrophysical Journal, Supplement*, 65:193.
- [Goldsmith and Langer, 1999] Goldsmith, P. F. and Langer, W. D. (1999). Population Diagram Analysis of Molecular Line Emission. *Astrophysical Journal*, 517(1):209–225.
- [Greve et al., 1996] Greve, A., Panis, J. F., and Thum, C. (1996). The pointing of the IRAM 30-m telescope. *Astronomy and Astrophysics, Supplement*, 115:379.
- [Hine, 2019] Hine, R. (2019). Report on visit to manga earth station, montevideo, uruguay, 11th to 15th march 2019. Technical report, School of Physics Astronomy - University of Leeds.
- [Hofner and Churchwell, 1996] Hofner, P. and Churchwell, E. (1996). A survey of water maser emission toward ultracompact H II regions. *Astronomy and Astrophysics, Supplement*, 120:283–299.
- [Hunter et al., 1997] Hunter, T. R., Phillips, T. G., and Menten, K. M. (1997). Active Star Formation toward the Ultracompact H II Regions G45.12+0.13 and G45.07+0.13. *Astrophysical Journal*, 478(1):283–294.
- [Ikeda et al., 2001] Ikeda, M., Ohishi, M., Nummelin, A., Dickens, J. E., Bergman, P., Hjalmarson, Å., and Irvine, W. M. (2001). Survey Observations of $c\text{-C}_2\text{H}_4\text{O}$ and CH_3CHO toward Massive Star-forming Regions. *Astrophysical Journal*, 560(2):792–805.
- [Isokoski et al., 2013] Isokoski, K., Bottinelli, S., and van Dishoeck, E. F. (2013). Chemistry of massive young stellar objects with a disk-like structure. *Astronomy and Astrophysics*, 554:A100.
- [ITU, 2000] ITU (2000). Determination of the g/t ratio for earth stations operating in the fixed-satellite service. Technical report, International Telecommunication Union. RECOMMENDATION ITU-R S.733-2.
- [Jaber Al-Edhari et al., 2017] Jaber Al-Edhari, A., Ceccarelli, C., Kahane, C., Viti, S., Balucani, N., Caux, E., Faure, A., Lefloch, B., Lique, F., Mendoza, E., Quenard, D., and Wiesenfeld, L. (2017). History of the solar-type protostar IRAS 16293-2422 as told by the cyanopolynes. *A&A*, 597:A40.
- [Kalenskii et al., 2000] Kalenskii, S. V., Promislov, V. G., Alakoz, A., Winnberg, A. V., and Johansson, L. E. B. (2000). Probing the properties of methyl cyanide sources. *Astronomy and Astrophysics*, 354:1036–1040.
- [Kalenskii et al., 2000] Kalenskii, S. V., Promislov, V. G., Alakoz, A. V., Winnberg, A., and Johansson, L. E. B. (2000). Determination of Molecular Gas Properties Using Methyl Cyanide Lines. *Astronomy Reports*, 44(11):725–737.
- [Kesteven, 2007] Kesteven, M. (2007). Radio-frequency interference mitigation in radio astronomy. *URSI Radio Science Bulletin*, 2007(322):9–18.
- [Kildal, 2000] Kildal, P.-S. (2000). *Foundations of antennas - a unified approach*. Studentlitteratur: Lund.
- [Kraus, 1986] Kraus, J. D. (1986). *Radio Astronomy 2nd edition*. University of New Hampshire Printing Services.
- [Liang, 2020] Liang, Y.-C. (2020). *Dynamic Spectrum Management From Cognitive Radio to Blockchain and Artificial Intelligence*. Springer Open.

Referencias

- [Liu et al., 2020] Liu, H.-L., Sanhueza, P., Liu, T., Zavagno, A., Tang, X.-D., Wu, Y., and Zhang, S. (2020). Chemistry of Protostellar Clumps in the High-mass, Star-forming Filamentary Infrared Dark Cloud G034.43+00.24. *Astrophysical Journal*, 901(1):31.
- [Liu et al., 2019] Liu, M., Tan, J. C., De Buizer, J. M., Zhang, Y., Beltrán, M. T., Staff, J. E., Tanaka, K. E. I., Whitney, B., and Rosero, V. (2019). The SOFIA Massive (SOMA) Star Formation Survey. II. High Luminosity Protostars. *Astrophysical Journal*, 874(1):16.
- [Mangum et al., 1991] Mangum, J. G., Wootten, A., and Mundy, L. G. (1991). Synthesis Imaging of the DR 21(OH) Cluster. I. Dust Continuum and C 18O Emission. *Astrophysical Journal*, 378:576.
- [Marr et al., 2015] Marr, J. M., Snell, R. L., and Kurtz, S. E. (2015). *Fundamentals of Radio Astronomy: Observational Methods (Series in Astronomy and Astrophysics)*.
- [McHale, 2017] McHale, J. L. (2017). *Molecular Spectroscopy*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [Meeks et al., 1968] Meeks, M. L., Ball, J. A., and Hull, A. B. (1968). The pointing calibration of the Haystack antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 16:746–751.
- [Mookerjee et al., 2007] Mookerjee, B., Casper, E., Mundy, L. G., and Looney, L. W. (2007). Kinematics and Chemistry of the Hot Molecular Core in G34.26+0.15 at High Resolution. *Astrophysical Journal*, 659(1):447–458.
- [Morisset et al., 2002] Morisset, C., Schaerer, D., Martin-Hernandez, N., Peeters, E., Damour, F., Baluteau, J.-P., Cox, P., and Roelfsema, P. (2002). A photoionization model of the compact hii region g29.96-0.02. *Astronomy and Astrophysics*, 386.
- [Moscadelli et al., 2013] Moscadelli, L., Li, J. J., Cesaroni, R., Sanna, A., Xu, Y., and Zhang, Q. (2013). A double-jet system in the G31.41 + 0.31 hot molecular core. *Astronomy and Astrophysics*, 549:A122.
- [Müller et al., 2005] Müller, H. S. P., Schlöder, F., Stutzki, J., and Winnewisser, G. (2005). The Cologne Database for Molecular Spectroscopy, CDMS: a useful tool for astronomers and spectroscopists. *Journal of Molecular Structure*, 742(1-3):215–227.
- [Müller, H. S. P. et al., 2009] Müller, H. S. P., Drouin, B. J., and Pearson, J. C. (2009). Rotational spectra of isotopic species of methyl cyanide, ch_3cn , in their ground vibrational states up to terahertz frequencies. *A&A*, 506(3):1487–1499.
- [Nicholson and Parker, 1973] Nicholson, P. S. and Parker, E. A. (1973). The radio diameter of the Sun from interferometer measurements at 9mm wavelength. *The Observatory*, 93:13–16.
- [NRAO, 2021a] NRAO (2021a). Spectral line.
- [NRAO, 2021b] NRAO (2021b). Splatalogue - database for astronomical spectroscopy.
- [Odenwald and Schwartz, 1993] Odenwald, S. F. and Schwartz, P. R. (1993). An IRAS Survey of Star-forming Regions toward Cygnus. *Astrophysical Journal*, 405:706.
- [Ofek, 2014] Ofek, E. O. (2014). MAAT: MATLAB Astronomy and Astrophysics Toolbox. Astrophysics Source Code Library, record ascl:1407.005.
- [Olmi et al., 1993] Olmi, L., Cesaroni, R., and Walmsley, C. M. (1993). Ammonia and methyl cyanide in hot cores. *Astronomy and Astrophysics*, 276:489–506.
- [Peel et al., 2019] Peel, M. W., Wuensche, C. A., Abdalla, E., Antón, S., Barosi, L., Browne, I. W. A., Caldas, M., Dickinson, C., Fornazier, K. S. F., Monstein, C., Strauss, C., Tancredi, G., and Villela, T. (2019). Baryon Acoustic Oscillations from Integrated Neutral Gas Observations: Radio Frequency Interference Measurements and Telescope Site Selection. *Journal of Astronomical Instrumentation*, 8(1):1940005.

- [Pickett et al., 1998] Pickett, H. M., Poynter, R. L., Cohen, E. A., Delitsky, M. L., Pearson, J. C., and Müller, H. S. P. (1998). Submillimeter, millimeter and microwave spectral line catalog. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 60(5):883–890.
- [Pollak, 2018] Pollak, A. (2018). *Receiver Technology for Radio Astronomy and Deep Space Communications*. PhD thesis, University of Oxford.
- [Purcell et al., 2006] Purcell, C. R., Balasubramanyam, R., Burton, M. G., Walsh, A. J., Minier, V., Hunt-Cunningham, M. R., Kedziora-Chudczer, L. L., Longmore, S. N., Hill, T., Bains, I., Barnes, P. J., Busfield, A. L., Calisse, P., Crighton, N. H. M., Curran, S. J., Davis, T. M., Dempsey, J. T., Derragopian, G., Fulton, B., Hidas, M. G., Hoare, M. G., Lee, J. K., Ladd, E. F., Lumsden, S. L., Moore, T. J. T., Murphy, M. T., Oudmaijer, R. D., Pracy, M. B., Rathborne, J., Robertson, S., Schultz, A. S. B., Shobbrook, J., Sparks, P. A., Storey, J., and Travouillon, T. (2006). A CH₃CN and HCO⁺ survey towards southern methanol masers associated with star formation. *Monthly Notices of the RAS*, 367(2):553–576.
- [Rathborne et al., 2010] Rathborne, J. M., Jackson, J. M., Chambers, E. T., Stojimirovic, I., Simon, R., Shipman, R., and Frieswijk, W. (2010). The early stages of star formation in infrared dark clouds: Characterizing the core dust properties. *The Astrophysical Journal*, 715(1):310–322.
- [Rathborne et al., 2006] Rathborne, J. M., Jackson, J. M., and Simon, R. (2006). Infrared Dark Clouds: Precursors to Star Clusters. *Astrophysical Journal*, 641(1):389–405.
- [Reda, 2003] Reda, I., A. A. (2003). Solar position algorithm for solar radiation application. NREL/TP-560-34302. Technical report, National Renewable Energy Laboratory (NREL).
- [Rieke et al., 2004] Rieke, G. H., Young, E. T., Engelbracht, C. W., Kelly, D. M., Low, F. J., Haller, E. E., Beeman, J. W., Gordon, K. D., Stansberry, J. A., Misselt, K. A., Cadien, J., Morrison, J. E., Rivlis, G., Latter, W. B., Noriega-Crespo, A., Padgett, D. L., Stapelfeldt, K. R., Hines, D. C., Egami, E., Muzerolle, J., Alonso-Herrero, A., Blaylock, M., Dole, H., Hinz, J. L., Le Floch, E., Papovich, C., Pérez-González, P. G., Smith, P. S., Su, K. Y. L., Bennett, L., Frayer, D. T., Henderson, D., Lu, N., Masci, F., Pesenson, M., Rebull, L., Rho, J., Keene, J., Stolovy, S., Wachter, S., Wheaton, W., Werner, M. W., and Richards, P. L. (2004). The Multiband Imaging Photometer for Spitzer (MIPS). *Astrophysical Journal, Supplement*, 154(1):25–29.
- [Rosero et al., 2013] Rosero, V., Hofner, P., Kurtz, S., Bieging, J., and Araya, E. D. (2013). Methyl cyanide observations toward massive protostars. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 207(1):12.
- [Ruze, 1966] Ruze, J. (1966). Antenna Tolerance Theory – A Review. *IEEE Proceedings*, 54:633–642.
- [Sanhueza et al., 2012] Sanhueza, P., Jackson, J. M., Foster, J. B., Garay, G., Silva, A., and Finn, S. C. (2012). Chemistry in Infrared Dark Cloud Clumps: A Molecular Line Survey at 3 mm. *Astrophysical Journal*, 756(1):60.
- [Shu et al., 1987] Shu, F. H., Adams, F. C., and Lizano, S. (1987). Star formation in molecular clouds: observation and theory. *Annual Review of Astron and Astrophysics*, 25:23–81.
- [Sirti, 1984] Sirti (1984). Standard a 32m antenna. Technical report, Sirti. URU/03/161/02-84.
- [Snell et al., 2019] Snell, R. L., Kurtz, S. E., and Marr, J. M. (2019). *Fundamentals of Radio Astronomy - Astrophysics*. CRC Press.
- [Southworth, 1945] Southworth, G. C. (1945). 1945, Microwave Radiation from the Sun (with Erratum). In *Classics in Radio Astronomy*, volume 10, page 168.
- [Stahler and Palla, 2004] Stahler, S. W. and Palla, F. (2004). *The Formation of Stars*.
- [Tafalla and Bachiller, 2011] Tafalla, M. and Bachiller, R. (2011). Molecules in bipolar outflows. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 7(S280):88–102.

Referencias

- [Tapping, 2022] Tapping, K., L. M. (2022). RTLSDR-based, Software Defined Radio Alternative to Switched Radiometers for Continuum Radio Astronomy. Technical report, Canadian Centre for Experimental Radio Astronomy.
- [Troitskii and Tikhonova, 1970] Troitskii, V. S. and Tikhonova, T. V. (1970). Thermal radiation from the moon and the physical properties of the upper lunar layer. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 13(9):981–1010.
- [Viti et al., 2004] Viti, S., Collings, M. P., Dever, J. W., McCoustra, M. R. S., and Williams, D. A. (2004). Evaporation of ices near massive stars: models based on laboratory temperature programmed desorption data. *Monthly Notices of the RAS*, 354(4):1141–1145.
- [Viti and Williams, 1999] Viti, S. and Williams, D. A. (1999). Time-dependent evaporation of icy mantles in hot cores. *Monthly Notices of the RAS*, 305(4):755–762.
- [Wilson et al., 2013] Wilson, T. L., Rohlfs, K., and Rüttemeister, S. (2013). *Tools of Radio Astronomy*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [Wood and Churchwell, 1989] Wood, D. O. S. and Churchwell, E. (1989). The Morphologies and Physical Properties of Ultracompact H II Regions. *Astrophysical Journal, Supplement*, 69:831.
- [Wyrowski et al., 1999] Wyrowski, F., Schilke, P., and Walmsley, C. M. (1999). Vibrationally excited HC₃N toward hot cores. *Astronomy and Astrophysics*, 341:882–895.
- [Xilinx, 2019] Xilinx (2019). An adaptable direct rf-sampling solution. Technical report, Xilinx, Inc. WP489 (v1.1).
- [Yan et al., 2021] Yan, Y. T., Henkel, C., Menten, K. M., Gong, Y., Ott, J., Wilson, T. L., Wooten, A., Brunthaler, A., Zhang, J. S., Chen, J. L., and Yang, K. (2021). Discovery of ammonia (9,6) masers in two high-mass star-forming regions. *arXiv e-prints*, page arXiv:2201.00021.
- [Zapata et al., 2012] Zapata, L. A., Loinard, L., Su, Y. N., Rodríguez, L. F., Menten, K. M., Patel, N., and Galván-Madrid, R. (2012). Millimeter Multiplicity in DR21(OH): Outflows, Molecular Cores, and Envelopes. *Astrophysical Journal*, 744(2):86.

Siglas

3CR Revised Third Cambridge Catalogue. 89

ACU Antenna Control Unit. 4, 47–49, 55, 71, 87, 88, 90, 92, 95, 102, 155, 158, 159

AGN Active Galactic Nucleus. 9, 18, 31

ETM Estación Terrena de Manga. 2, 11, 33, 41, 42, 44, 46, 48, 50, 52, 54–56, 72, 75, 76, 78, 84, 87, 131, 155

GBT Green Bank Telescope. 11, 12, 21, 60, 62, 120

HMC Hot Molecular Core. 11, 12, 103–114, 117, 120, 121, 123, 126, 128–130, 132, 156, 160

HPBW Half Power Beamwidth. 34, 35, 39, 43, 48, 54, 84, 99, 102, 119

Jy Jansky. 14, 15, 118, 161

LNA Low Noise Amplifier. 8, 35, 36, 39, 51, 52, 70, 77, 84, 85, 89, 155, 158

LO Local Oscillator. 35–37

MASER Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation. 19, 30

OMT Orthomode Transducer. 7, 8

RFI Radio Frequency Interference. 1, 2, 11, 39, 57–64, 66–68, 70–74, 84, 131, 132, 155, 157–159

SDR Software Defined Radio. 8, 11, 75–77, 82, 83, 131, 155, 159

SFR Star Forming Region. 31

VLBI Very Long Baseline Interferometry. 3, 8–10, 131

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Índice de tablas

2.1. Subbandas de radar de microondas (Fuente: V. Belitsky, R. Monje, M. Pantaleev y V. Vassilev (2007). <i>Lecture Handouts - Microwave Engineering in Communications</i> . Chalmers University Of Technology, 2007.	14
2.2. Algunos marcos de referencia utilizados para referir la velocidad de fuentes astronómicas ([NRAO, 2021a]).	22
2.3. Constantes rotacionales B_0 de moléculas abundantes en el medio interestelar, y frecuencias de algunas de sus transiciones rotacionales. Las frecuencias de la transición $J=1-0$ ($v=0$) son de [NRAO, 2021b], mientras que el resto de valores fue calculado a partir de ellas mediante la Ec. 2.48.	26
2.4. Constantes rotacionales B_0 de isotópologas de HC_3N , y diferencia con respecto a las frecuencias correspondientes de la Tabla 2.3.	26
2.5. Estructura hiperfina de la transición $J = 2 - 1$ de CH_3CN . $v = 0$ indica que el estado vibracional es el fundamental ([Pickett et al., 1998]).	27
3.1. Características técnicas del sistema de movimiento y tracking (Fuente: [Sirti, 1984]).	44
3.2. Datos de precisión del ACU (Fuente: Manual del fabricante).	48
3.3. Principales características técnicas del LNB en banda C.	53
3.4. Principales características técnicas del LNB en banda Ku.	53
3.5. Principales características de la antena de 4.2m.	54
3.6. Radiotelescopios que podrían estar disponibles en la ETM mediante la reconversión de las antenas 2A, 3A y 106.	55
4.1. Principales características del receptor CRFS RFeye Node 100-18, obtenidas de su hoja de datos.	64
4.2. Características de las dos configuraciones utilizadas para el monitoreo de RFI.	64
4.3. Listado de estaciones FM de la ciudad de Morelia (Michoacán, México), de acuerdo a los Datos Abiertos del RPC del IFT.	69
4.4. Listado de estaciones de TV de la ciudad de Morelia (Michoacán, México), de acuerdo a los Datos Abiertos del RPC del IFT.	69
5.1. Principales características del SDR Ettus USRP X300.	76
5.2. Características del LNA MiniCircuits modelo ZX60-63GLN+. Todos los valores corresponden a lo especificado en hoja de datos para 1.8 GHz.	85
6.1. Caption	91
6.2. Valores (en grados) de los parámetros obtenidos del modelo de apuntamiento. La submuestra corresponde a la utilizada luego del proceso iterativo descrito en el texto ($RMS \leq \theta_{HPBM}/10$).	95

Índice de tablas

6.3. Métricas de desempeño del modelo de apuntamiento. La submuestra corresponde a la utilizada luego del proceso iterativo descrito en el texto ($RMS \leq \theta_{HPBM}/10$).	95
6.4. Efemérides del Sol generadas por la aplicación <i>Horizons</i> de JPL. En negrita se indica el tiempo y posición elegidos.	95
6.5. Parámetros obtenidos del ajuste gaussiano a los datos reducidos del tránsito solar. Las incertidumbres Δ asociadas surgen del intervalo de confianza del 95 % del ajuste (HLU indica hora local uruguaya).	96
7.1. Bandas utilizadas en la observación de los HMC.	120
7.2. Algunas de las líneas de cianopolinas presentes en las bandas seleccionadas.	120
7.3. Lista de fuentes seleccionadas.	121
7.4. Resumen de las transiciones moleculares detectadas.	123
7.5. Resumen de detecciones moleculares y tasas de detección.	124
7.6. Líneas de recombinación observadas.*	125
7.7. Datación de fuentes basada en detecciones y modelos químicos disponibles.*	126
7.8. Constreñimiento de edades basadas en estimaciones de edad y otros indicadores, tal como se explica en el texto.	129
D.1. Parámetros de ajustes gaussianos a líneas detectadas en HMCs.*	146

Índice de figuras

1.1. Resultados de las mediciones de RFI llevadas a cabo por el autor en el marco del Proyecto Bingo, en los sitios de Castrillón (Minas de Corrales, Rivera) y Arerunguá (Salto) (fuente de imagen: [Peel et al., 2019]).	2
1.2. Motor original (izq.) y servomotor con que se lo reemplazó (der.) para el sistema de apuntamiento de la antena, del radiotelescopio de Ghana. (Cortesía de Japie Ludick, grupo AVN de SARAQ).	4
1.3. Cuadro que indica los límites de Ruze para distintas bandas de microondas, así como las bandas de operación de distintos instrumentos radioastronómicos. (Cortesía de David Gale, INAOE).	5
1.4. Obtención de imágenes para fotogrametría, realizada en la antena de 9m de la Universidad de Costa Rica. (Cortesía de David Gale, INAOE).	6
1.5. Resultados de la fotogrametría realizada para el reflector principal del GTM. (Cortesía de David Gale, INAOE).	7
1.6. Principio clásico de diseño de <i>back-</i> y <i>front-end</i> basado en receptor superheterodino, y diseño basado en tarjeta RfSoC (Fuente de imagen: [Xilinx, 2019]).	9
1.7. Estación Terrena de Goonhilly. (Cortesía de Ian Jones).	10
2.1. Esquema de magnitudes que intervienen en la definición de la intensidad (Fuente de imagen: [Wilson et al., 2013]).	15
2.2. Radiación de cuerpo negro en el régimen de Rayleigh Jeans, para distintas temperaturas.	17
2.3. Densidad de flujos continuos de algunas fuentes brillantes en radio (izq.), y características típicas de distintos espectros de emisión de continuo de radio (der.) (Fuente de imagen: [Kraus, 1986]).	18
2.4. Molécula diatómica compuesta por átomos de masas M_1 y M_2 , a distancias del centro de masas r_1 y r_2 , respectivamente.	25
2.5. Diagrama de niveles energéticos con escaleras K en moléculas trompo-simétricas. En este ejemplo, aplicable a moléculas con forma de prolato, para un mismo J, la energía aumenta con K^2 . ([McHale, 2017]).	27
2.6. Esquema simplificado del mecanismo máser para dos niveles (Fuente de imagen: [Estalella and Anglada, 1999]).	31
2.7. Polarizaciones elíptica izquierda, circular izquierda y lineal.	33
2.8. Esquema básico de un receptor superheterodino.	36
2.9. Esquema de señales que intervienen en la modulación en un receptor superheterodino: $s(t)$ representa la señal RF, $p(t)$ la moduladora y $r(t)$ el producto de ambas.	37
2.10. Transformadas de Fourier de las señales que intervienen en la modulación en un receptor superheterodino.	37

Índice de figuras

2.11. Diagrama de bloque de receptor conectado a antena, para ilustrar la cuantificación del ruido (Fuente de figura: [Kildal, 2000]).	38
3.1. Antena 2A de 32m de diámetro.	42
3.2. Subreflector roto de la antena 2A.	42
3.3. Sistema <i>wheel-and-track</i> para el movimiento en acimut.	43
3.4. Componentes de repuesto disponibles para el sistema de lubricación del tornillo de elevación: bomba de lubricación (izq.) y filtros (der.).	43
3.5. Desmontaje de vaina de protección del tornillo de elevación, para realizar el cambio de aceite.	44
3.6. Trabajos de cambio de aceite de lubricación, realizados en 2019.	44
3.7. Trabajos de limpieza de estructura que se realizaron en paralelo al mantenimiento correctivo del tornillo de elevación.	45
3.8. Reflector principal de antena 2A. En verde se indican los paneles dañados (Fuente: [Sirti, 1984]).	46
3.9. Croquis de bocina de alimentación de antena 2A (Fuente: [Sirti, 1984]).	47
3.10. Vista general de la antena 3A de 16.4m de diámetro.	48
3.11. Panel de control de la unidad de control de antena (ACU).	49
3.12. Motor de movimiento en acimut.	49
3.13. Tornillo de movimiento en acimut.	50
3.14. Motor de movimiento en elevación.	50
3.15. Tornillo de movimiento en elevación.	51
3.16. Diagrama de bloques del sistema de recepción redundante 1:2 (Fuente de imagen: [Applied Telecommunications, 1997]).	52
3.17. Curva de temperatura de ruido dentro del rango de operación del LNA MAX-TECH LCB-4033 (Fuente de imagen: [Applied Telecommunications, 1997]).	52
3.18. Antena de 4.5m y foco primario, con recepción en banda C y Ku.	53
3.19. Feeder de antena de 4.2m, localizado en el foco del reflector.	54
4.1. Filtros marca Norsat modelo 3200 BPF, diseñados específicamente para su uso en cabeceras satelitales en banda C, para suprimir la interferencia adyacente proveniente de servicios 5G en la banda 3500.	61
4.2. Atenuación de los filtros Norsat. Las distintas curvas corresponden a tres posibles configuraciones de hardware, adecuadas según el nivel de interferencias de 5G percibidos en el enlace satelital.	61
4.3. Receptor CRFS RFeye node 100-18 (Fuente de imagen: manual del fabricante).	63
4.4. Imagen de la antena Steatite QOM-SL-0.01-1-N-SG-R (Fuente: hoja de datos del fabricante).	65
4.5. Patrones de radiación vertical de la antena Steatite QOM-SL-0.01-1-N-SG-R para distintas frecuencias dentro del rango de operación (Fuente: hoja de datos del fabricante).	66
4.6. Ganancia de la antena Steatite QOM-SL-0.01-1-N-SG-R (Fuente: hoja de datos del fabricante).	66
4.7. Imagen de la antena ElectroMetrics EM-6865A (izq.) y curva de ganancia en función de la frecuencia (Fuente: hoja de datos del fabricante).	67
4.8. Interfaz gráfica de la aplicación desarrollada para el procesamiento de datos de RFI.	67
4.9. Espectro del Scan 0 (87-999 MHz) para un instante de tiempo del 23/01/2023.	68
4.10. Espectro del Scan 1 (2000-6999 MHz) para un instante de tiempo del 23/01/2023.	68
4.11. Espectrograma del 23/1/2023 en Morelia, correspondiente al escaneo 0 (88-1000 MHz).	70

Índice de figuras

4.12. Espectrograma ampliado en la banda de UHF destinada a TV, con la identificación de las señales de la Tabla 4.4, más una señal con estación en Pátzcuaro (Azteca Uno).	71
4.13. Espectrograma ampliado en las bandas de 800 (869-894 MHz) y 700 (758-803 MHz) para IMT (Ver informe "IMT en Mexico", del IFT, disponible (30/1/2024) aquí).	72
4.14. Espectrograma del 22/1/2023 en Morelia, correspondiente al escaneo 1 (2000-7000 MHz).	73
4.15. Analizador de espectro conectado al puerto indicado "POL A (-20dB)" en la sala de control de la antena 3A, que muestra las señales de RFI de 5G, Wi-Max y del satélite Intelsat 35 a ~4.1GHz (esta última se aprecia más claramente en la figura de la derecha, cuando se apuntó la antena al satélite).	73
4.16. Serie temporal de 30 minutos de la potencia total detectada en la antena 3A (arriba), y señales resultantes de aplicar suavizados de mediana móvil de 5 (medio) y 20 (abajo) segundos.	74
5.1. Imagen del Ettus USRP X300 utilizado. El círculo rojo marca los canales de entrada del subdevice A.	77
5.2. Imagen del generador de señales Agilent modelo N5818b utilizado para testear los flowgraph diseñados.	77
5.3. Flowgraph del radiómetro para banda L.	78
5.4. Salida generada por el diagrama de flujo del radiómetro para banda L, al inyectarle un sweep en amplitud con el generador de señal.	79
5.5. Flowgraph del espectrómetro para banda L.	79
5.6. Curvas de respuesta del detector de potencia MiniCircuits ZX47-60LN+ (Fuente de imagen: hoja de datos del fabricante).	80
5.7. Histogramas de series de datos adquiridos con el radiómetro en la primera configuración (ver texto).	81
5.8. Histogramas de series de datos adquiridos con el radiómetro en la segunda configuración (ver texto).	82
5.9. Imagen de un Ettus B200 mini. El canal de TX está conectado al RX2 a través de un atenuador de 30 dB, a los efectos de verificar el funcionamiento deseado.	82
5.10. Flowgraph de gnuradio para generar una señal de 4GHz, de potencia variable manualmente.	83
5.11. Espectros y espectrogramas de la señal de 4 GHz generada por el SDR, para ganancia nula (a) y máxima (b).	83
5.12. Flowgraph para la generación de un tono modulado en amplitud por un pulso o tren de pulsos gaussianos.	84
5.13. Señal medida por el radiómetro, para señal moduladora de duración ($\pm 3\sigma$) 15 segundos. El período de muestreo fue de 200 ms.	85
5.14. Vista interior del radiómetro en su diseño final.	86
6.1. Esquema de bloques que ilustra el pasaje de coordenadas deseadas (A,E) a comandadas al ACU de la antena (A_{ACU}, E_{ACU}), a través de un modelo de apuntamiento (PM).	88
6.2. Atenuación generada por errores de apuntamiento de un paraboloide, en función del error expresado en fracción del FWHM de la antena.	88
6.3. Interfaz gráfica de aplicación desarrollada para análisis de datos obtenidos con el radiómetro. Una explicación de cada parte indicada con números se da en el texto.	90

Índice de figuras

6.4. Corrección (en °) en azimut $\Delta A = A_{PM} - A$ aplicada por el modelo en todo el rango de movimiento de la antena. Los círculos rojos indican los puntos utilizados para construir el PM. Las curvas celestes indican el plano ecuatorial (continua) más menos $\pm 10^\circ$ (punteadas).	91
6.5. Corrección (en °) en elevación $\Delta E = E_{PM} - E$ aplicada por el modelo en todo el rango de movimiento de la antena. Los círculos rojos indican los puntos utilizados para construir el PM. Las curvas celestes indican el plano ecuatorial (continua) $\pm 10^\circ$ (punteadas).	92
6.6. Gráfico de "modelo vs. dato", en azimut. La curva roja superpuesta es $y(Az_{ACU}) = Az_{ACU}$. 93	
6.7. Gráfico de "modelo vs. dato", en elevación. La curva roja superpuesta es $y(E_{ACU}) = E_{ACU}$. 93	
6.8. Error asociado a cada punto (en °) en función de la elevación.	94
6.9. Errores asociado a cada punto de la submuestra utilizada para el modelo de apuntamiento, generada mediante el proceso iterativo descrito en el texto.	94
6.10. Datos crudos del radiómetro generados por el tránsito solar descrito en el texto.	96
6.11. Datos radiométricos reducidos y curva de ajuste gaussiano (roja) superpuesta.	97
6.12. Posiciones del Sol y la Luna a las 14:25 (hora local uruguaya) del 8/4/2024, para las coordenadas de la Estación Terrena de Manga (LAT -34.8039N; LON -55.1406E).	98
6.13. Tránsitos sucesivos de la Luna y el Sol, detectados el 8/4/2024 alrededor de las 14:30 hora local uruguay.	98
6.14. Patrón de radiación gaussiano asumido para la antena 106.	99
6.15. Esquema del tránsito solar que ilustra el ensanchamiento detectado. Se indican los ángulos sólidos de la antena (subíndice A) y fuente (S).	100
6.16. Modelos de señal de potencia detectada (azul) a partir del patrón de radiación de la antena (roja, punteada) y del perfil asumido para la fuente (naranja).	101
7.1. Ilustración de dos morfologías posibles de un HMC conteniendo una protoestrella, con geometría esférica (izq.) y con disco achatado y flujos bipolares (der.) (Fuente de imagen: [Isokoski et al., 2013]).	107
7.2. Evolución temporal de la abundancia relativa de HC_3N/HC_5N para tres escenarios físicos distintos, basados en las densidades columnares obtenidas en el modelo químico descrito en [Chapman et al., 2009] (Ver sus Figuras 1, 9 y 10).	108
7.3. Modelos de evolución temporal de abundancias de distintas moléculas grandes en un HMC (Fuente de imagen: [Viti et al., 2004]).	109
7.4. Modelos de evolución temporal de abundancias de distintos sulfuros en un HMC (Fuente de imagen: [Viti et al., 2004]).	110
7.5. Curvas de nivel de la línea $NH_3(4,4)$ (24139.417 MHz) superimpuestas a mapa de continuo a 1.3 cm (promedio de canales libres de líneas espectrales), obtenidos con el VLA. En esta imagen se aprecia claramente la forma cometaria de la región HII, frente a la cual se ubica el HMC. Las cruces indican la posición de máseres de H_2O (Fuente de imagen: [Cesaroni et al., 1994a]).	111
7.6. Mapa de intensidad a 1.3 mm de G31, obtenido con ALMA. La cruz roja indica la posición de la región UC HII. La morfología de este HMC está compuesta por dos núcleos, denominados en [Beltrán et al., 2018] "Main" y "NE". (Fuente de imagen: [Beltrán et al., 2019])	112
7.7. Mapa del continuo de G34.26+0.15 a 1.36 cm de G34, obtenido con VLA, superpuesto a imagen GLIMPSE de Spitzer $4.5 \mu m$. Las elipses negras muestran la emisión de $NH_3(9,6)$ con estrellas en su centro (M1, M2, and M3). Se indican las posiciones de los máseres de OH, H_2O y CH_3OH como diamantes, círculos y cuadrados, respectivamente (Fuente de imagen: [Yan et al., 2021])	113

7.8. Curvas de nivel de la emisión integrada de CO J=3-2 en el campo de las fuentes G45.12 y G45.07. Los triángulos marcan la posición de las regiones UC HII, de acuerdo a [Wood and Churchwell, 1989] (Fuente de imagen: [Hunter et al., 1997]). 114

7.9. Curvas de nivel a $11.7\mu\text{m}$ de G45.07. Las cruces indican la posición de máseres de agua reportados en [Hofner and Churchwell, 1996]. La región UC HII es la encerrada dentro del cuadrado, que se encuentra ampliada en la esquina superior derecha. Unos $2''$ al norte está la fuente identificada como DRT03 3, que albergaría una HMPO (Fuente de imagen: [De Buizer et al., 2005]). 115

7.10. Escaneos cruzados de la transición $\text{CH}_3\text{CN J}=12-11$ en IRAS202126. Los escaneos están separados un haz completo ($\theta_{mb} = 38''$, indicado en la esquina inferior izquierda). Las componentes K de la transición se indican bajo las líneas punteadas, debajo de cada espectro (Fuente de imagen: [Rosero et al., 2013]) 116

7.11. Gráficos de velocidad central (izquierda) y FWHM (derecha) de los ajustes gaussianos a transiciones hiperfinas de $\text{CH}_3\text{CN J}=12-11$, en función de la energía de la transición. (Fuente de imagen: [Rosero et al., 2013]) 117

7.12. Imagen de continuo de radio a 1.4 mm (color y contornos blancos, unidades $\text{mJy}\cdot\text{beam}^{-1}$) de la región DR21(OH) obtenida con el SMA. Los contornos rojos corresponden continuo de radio en 7 mm (Zapata et al. 2009). Los contornos blancos corresponden a 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25, 30, 35, y 40 veces $5\text{ mJy}\cdot\text{beam}^{-1}$ (rms del ruido de la imagen a 1.4mm). Los contornos rojos son -5, 5, 6, 7, 8, 9, y 10 veces $0.9\text{ mJy}\cdot\text{beam}^{-1}$ (rms del ruido de la imagen a 1.4mm). Los triángulos verdes indican la posición de las fuentes de radio reportadas por [Araya et al., 2009]. Los cuadrados violetas indican las posiciones de las fuentes de 2.7mm reportadas en [Mangum et al., 1991]. (Fuente de imagen: [Zapata et al., 2012]). . 118

7.13. Nubes infrarrojas oscuras G034.43+00.24 (a), G030.97-00.14 (b) y G031.97+00.07 (c). Los números indican la posición de los distintos núcleos que alberga cada nube. Las curvas de nivel corresponden a mediciones en radio continuo a 1.2 mm, superpuestas a una imagen en el IR medio ($8\mu\text{m}$), del MSX $8\mu\text{m}$ Galactic Plane Survey (Fuente de imágenes: [Rathborne et al., 2006]) 119

7.14. Espectros de la ventana 1 para todas las fuentes. Las líneas de recombinación de Hidrógeno H89 γ y H78 β fueron detectadas en fuentes conteniendo regiones UC HII. 121

7.15. Espectros de la ventana 2 para todas las fuentes, conteniendo las transiciones J=11-10 v=0 HC_5N , 30(7,24)-31(6,25) CH_3OH y J=4-3 SO_2 transitions. 122

7.16. Espectros de la ventana 3 para todas las fuentes, conteniendo las transiciones J=4-3 HC_3N , las líneas de recombinación H56 α , H80 γ y He56 α , así como la transición 15(2, 13) – 15(2, 14) OCS. 122

7.17. Espectros de la ventana 3 para todas las fuentes, conteniendo las transiciones J=2-1 CH_3CN y la línea de recombinación H70 β HRL. 123

7.18. Abundancias relativas de HC_3N con respecto a HC_5N , obtenidas a partir de las integrales de línea y la Ec. 2.64. Las barras de error corresponden al método de max/min utilizando los errores especificados en D.1. 124

7.19. Velocidad central de línea para las distintas moléculas detectadas en relación a HC_3N . La línea sólida negra indica un offset de cero, y las azules indican offsets de $\pm 0.5\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. Las barras de error corresponden a incertidumbres 1σ 127

7.20. Diagrama de Box y Whisker del FWHM de las distintas transiciones moleculares. 128

7.21. Diagrama de Box y Whisker del FWHM de las distintas transiciones moleculares, agrupadas por fuente. 128

A.1. 134

B.1. 136

Índice de figuras

C.1. Presupuesto general	139
C.2. Tareas y presupuesto de Fase 0.	140
C.3. Tareas y presupuesto de Fase 1.	141
C.4. Tareas y presupuesto de Fase 2.	142
C.5. Tareas y presupuesto de Fase 3.	142
C.6. Cronograma tentativo del Proyecto.	142

Esta es la última página.
Compilado el miércoles 11 diciembre, 2024.
<http://iie.fing.edu.uy/>