

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**IMPLEMENTACIÓN DE UN OSCILADOR GUNN EN UN
RECEPTOR A 115 GHz, PARA FINES
RADIOASTRONÓMICOS**

WALTER KENNERTH MAX-MOERBECK ASTUDILLO

2005

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELÉCTRICA

**IMPLEMENTACIÓN DE UN OSCILADOR GUNN EN UN RECEPTOR A
115 GHZ, PARA FINES RADIOASTRONÓMICOS**

WALTER KENNERTH MAX-MOERBECK ASTUDILLO

COMISIÓN EXAMINADORA	CALIFICACIONES		
	NOTA(nº)	(Letras)	FIRMA
PROFESOR GUÍA: SR. JORGE MAY
PROFESOR CO-GUÍA: SR. HELMUTH THIEMER
PROFESOR INTEGRANTE: SR. NICOLÁS BELTRÁN
NOTA FINAL EXAMEN DE TÍTULO:

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA**

SANTIAGO DE CHILE
JUNIO 2005

Agradecimientos

A Marta Astudillo y Lidia Guerra, mi madre y mi abuela, por enseñarme a superar los problemas, por comprenderme y apoyarme incondicionalmente durante todo este tiempo. Espero algún día poder devolverles algo de lo que me han dado.

A Laurita, sin su compañía todo hubiera sido más difícil. Gracias por estar conmigo y ayudarme cuando perdía el rumbo.

A los profesores, Sr. Jorge May y Sr. Leonardo Bronfman, ambos del Departamento de Astronomía, por su confianza y apoyo durante el desarrollo de este trabajo y de otros importantes proyectos personales.

Al Sr. Fernando Olmos del Departamento de Astronomía, por su ayuda en el traslado de la instrumentación desde Cerro Tololo a Cerro Calán, y con el trabajo en el taller mecánico.

También quisiera agradecer a todos aquellos que de alguna u otra forma me han ayudado a llegar a esta instancia. Son muchos más los nombres que tendría que incluir, mi familia, la familia de Laura, Claudio Hidalgo, compañeros y amigos, algunos profesores del Instituto Nacional, y algunos profesores y funcionarios de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, a todos ellos gracias.

Para terminar quisiera agradecer el apoyo que siempre sentí de parte de la Universidad, que por medio de la Beca Universidad de Chile, entre otras cosas, me permitió llegar a este momento. Espero algún día contribuir a la multiplicación de este tipo de iniciativas que hacen posible la realización de los sueños de algunos jóvenes afortunados como yo.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Motivación	2
1.2. Objetivos del trabajo de título	3
1.3. Estructura de este informe	3
2. Descripción del radiotelescopio	4
2.1. Introducción	4
2.1.1. Receptor	4
2.2. Descripción general del radiotelescopio	10
2.3. Sistema receptor	12
2.3.1. Primera etapa (<i>front-end</i>)	12
2.3.2. Primera etapa de frecuencia intermedia	13
2.3.3. Segunda etapa de frecuencia intermedia y espectrómetro	13
3. Oscilador Local	19
3.1. Oscilador local original	20
3.1.1. Características del Klystron	21
3.2. Oscilador Gunn	23
3.2.1. Principios de operación	23
3.2.2. Características	26
3.3. Comparación con el Klystron	27
3.4. Aspectos básicos sobre el <i>Phase Lock Loop</i>	28

4. Instalación del oscilador Gunn	30
4.1. Traslado de la instrumentación y del oscilador local original	30
4.2. Diseño del nuevo oscilador local	32
4.3. Proceso de especificación y adquisición de los componentes	33
4.4. Principios de funcionamiento y especificaciones de los componentes del os- cilador local	35
4.4.1. Oscilador Gunn	35
4.4.2. <i>Phase Lock Loop</i>	36
4.4.3. <i>Harmonic mixer</i>	37
4.4.4. Diplexor	37
4.4.5. Oscilador de referencia para el PLL	38
4.4.6. Oscilador local para <i>harmonic mixer</i>	39
4.4.7. Atenuadores	40
4.4.8. Aislador	41
4.4.9. Acoplador direccional	43
4.4.10. Conectores y guías de onda	45
4.5. Pruebas de laboratorio	46
4.5.1. Pruebas del receptor usando el oscilador Klystron	46
4.5.2. Pruebas del nuevo oscilador local	47
5. Resultados y comentarios finales	49
A. Operación del oscilador Klystron en el laboratorio	53
B. Operación del oscilador Gunn en el laboratorio	57
C. Costo de los dispositivos adquiridos	61
D. Documentación adicional	62

Índice de figuras

2.1.	Esquema básico de un radiotelescopio.	5
2.2.	Diagrama de radiación del radiotelescopio	11
2.3.	Esquema de la montura del radiotelescopio	15
2.4.	Diagrama de bloques del radiotelescopio.	16
2.5.	Diagrama de bloques del receptor del radiotelescopio.	17
2.6.	Espectro de CO típico obtenido con el radiotelescopio [2].	18
3.1.	Esquema básico de un Klystron [8]	21
3.2.	Potencia de salida versus frecuencia para el Klystron usado en el receptor.	22
3.3.	Característica corriente-voltaje de un dispositivo Gunn [8].	23
3.4.	Dispositivo Gunn en modo de tiempo de tránsito [8].	24
3.5.	Dispositivo Gunn en modo de carga espacial limitada [8].	25
3.6.	Ejemplo de configuración de oscilador Gunn [8].	25
3.7.	Otro ejemplo de configuración de oscilador Gunn [8].	26
3.8.	Potencia de salida versus frecuencia para el oscilador Gunn de J. E. Carlstrom Co.	27
3.9.	Oscilador Gunn de J. E. Carlstrom Co.	27
3.10.	Configuración básica de un <i>Phase Lock Loop</i>	29
4.1.	Ubicación del oscilador local en el radiotelescopio.	31
4.2.	Vista general del laboratorio instalado en el DAS	32
4.3.	Diagrama de bloques del nuevo oscilador local.	34
4.4.	<i>Phase Lock Loop</i> para oscilador Gunn de XL Microwave.	36
4.5.	<i>Harmonic mixer</i> para banda W de Pacific Millimeter Products.	38

4.6. Atenuador giratorio.	40
4.7. Atenuador para banda W de Aerowave Inc.	41
4.8. Funcionamiento del aislador	42
4.9. Aislador para banda W de Aerowave Inc.	43
4.10. Esquema de funcionamiento del acoplador direccional.	44
4.11. Acoplador direccional para banda W de Aerowave Inc.	45
4.12. Conectores de radiofrecuencia usados.	46
4.13. Antiguo oscilador local en el laboratorio.	47
4.14. Oscilador Gunn y PLL en el Laboratorio.	48
A.1. Diagrama de conexiones para la operación del Klystron en el laboratorio.	56
B.1. Diagrama de conexiones para prueba de oscilador Gunn en el laboratorio.	60

Índice de cuadros

2.1. Especificaciones del radiotelescopio.	11
4.1. Datos básicos oscilador Gunn de J. E. Carlstrom Co.	35
C.1. Costos de los dispositivos adquiridos.	61

Capítulo 1

Introducción

La radioastronomía es el estudio del universo por medio de la radiación electromagnética recibida en frecuencias que van entre 10 MHz a 1000 GHz ¹. Sus inicios se remontan a los primeros trabajos de Karl Jansky en 1931, un ingeniero de radio de la Bell Telephone, que estudiando las fuentes de ruido que podrían afectar la radiotelefonía transoceánica que se estaba desarrollando en esos años, descubrió una fuente de ruido que estaba fija en el espacio. Esta fuente de ruido detectada por Jansky resultó ser el centro de nuestra galaxia. Los trabajos pioneros de Jansky y otros hombres de ciencia dieron origen a la que actualmente es una de las principales áreas de la astronomía [13]. Debido a la inusual transparencia de la atmósfera en estas longitudes de onda, la radioastronomía se ha convertido en una herramienta fundamental en el estudio del universo, puesto que es posible realizar observaciones desde la Tierra, de una gran cantidad de fenómenos de interés astrofísico que sirven para realizar investigaciones en áreas como cosmología, nubes moleculares, formación y evolución estelar, sistema solar y planetas extrasolares.

La enorme utilidad de la radioastronomía hace que actualmente existan en operación y se esté construyendo una gran cantidad de radiotelescopios. Dentro de este panorama Chile se verá muy beneficiado con la construcción en la Región de Atacama del más grande proyecto radioastronómico de la historia, el radiotelescopio ALMA (*Atacama Large Millimeter Array*).

¹Esta división no es absoluta. Algunos autores hablan de radioastronomía como el uso de detectores coherentes (capítulo 2).

Es claro que la radioastronomía tiene un gran impacto en la ciencia mundial, sin embargo lo que parece más relevante en el mediano plazo es la gran cantidad de proyectos de ésta área que se están desarrollando en Chile. Por esta razón es muy importante que como país desarrollemos la capacidad de involucrarnos tanto en las áreas netamente científicas como en las más ligadas al desarrollo tecnológico.

1.1. Motivación

El Departamento de Astronomía de la Universidad de Chile (DAS), a través de una colaboración con la Universidad de Harvard, opera un radiotelescopio para la banda milimétrica ubicado en *Cerro Tololo Interamerican Observatory*, La Serena, Chile. Este radiotelescopio ² fue diseñado para observar a la frecuencia de 115.3 GHz permitiendo el estudio de la distribución de hidrógeno molecular H_2 , por medio de la detección de la línea de emisión de la transición $J = 1 - 0$ de la molécula de monóxido de carbono CO , que es un trazador del H_2 . Este radiotelescopio ha estado en operación desde 1984 y ha dado origen a importantes publicaciones científicas relacionadas con la estructura de la Vía Láctea ([2], [3], [11], entre otras). Actualmente el radiotelescopio se encuentra fuera de uso pues se requiere realizar una serie de modificaciones que mejorarán su desempeño, permitiendo que nuevamente sea capaz de generar datos de interés científico y realizar labores de apoyo a la docencia en Astronomía e Instrumentación. Una de las principales razones para efectuar estas modificaciones es la de realizar un estudio del centro de la Vía Láctea usando las transiciones de $SiO(J = 2 - 1)$ a 86 GHz y $HCO^+(J = 1 - 0)$ a 89 GHz, lo que permitiría determinar el mecanismo responsable de que la temperatura del gas molecular al centro de la Vía Láctea sea cercana a 150 K.

²En las referencias se le denomina de distintas formas: *1.2m Southern Millimeter-Wave Telescope SMWT*, *Sothtern Mini*, Columbia-U. de Chile.

1.2. Objetivos del trabajo de título

El objetivo de este trabajo es reemplazar el antiguo oscilador local del radiotelescopio operado por el Departamento de Astronomía de la Universidad de Chile. El antiguo oscilador local del tipo Klystron, es reemplazado por uno del tipo Gunn. De este modo se hará posible observar líneas espectrales en un mayor rango de frecuencias, además de mejorar el rendimiento, confiabilidad y simplificar la operación del radiotelescopio. El trabajo se desarrolla en el DAS, para lo cual se tuvo que trasladar la instrumentación disponible en Cerro Tololo para la operación del radiotelescopio y del oscilador local en particular.

El diseño del nuevo oscilador local se basa en el usado en el *1.2m Northern Millimeter-Wave Telescope*, gemelo de este telescopio que está ubicado en Boston y que es operado por el *Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics*.

1.3. Estructura de este informe

El primer capítulo es una introducción general, explica las motivaciones y alcances del trabajo y define los objetivos. El segundo capítulo es una introducción a los principales aspectos sobre radiotelescopios y entrega una detallada descripción del receptor del radiotelescopio, la que permite comprender el lugar que el oscilador local tiene dentro del sistema. En el tercer capítulo, se describe en forma detallada el oscilador local original y se tratan los principales aspectos relacionados con el oscilador Gunn. El cuarto capítulo entrega una descripción del diseño del nuevo oscilador local, reseña las etapas más relevantes del trabajo, describe los principios de funcionamiento y características de los principales componentes. Para terminar se presentan los resultados de las pruebas realizadas en el laboratorio. El último capítulo contiene una síntesis del trabajo realizado y reúne los principales resultados. También se incluyen apéndices con la descripción de los procedimientos de operación del oscilador local, los costos de los principales dispositivos y sus hojas de datos.

Capítulo 2

Descripción del radiotelescopio

2.1. Introducción

Para la realización del trabajo se requiere comprender los principales aspectos de las tecnologías involucradas y tener una visión global sobre el funcionamiento del radiotelescopio. Para lograr este objetivo es conveniente hacer una breve revisión de los aspectos básicos sobre radiotelescopios y radioastronomía. Para comenzar se presenta el esquema básico de un radiotelescopio con un receptor coherente y se describe las principales características de éste (figura 2.1).

2.1.1. Receptor

El receptor más común de un radiotelescopio es el coherente o superheterodino, éste es conceptualmente idéntico a los usados en telecomunicaciones, sin embargo los requerimientos sobre cada uno de sus componentes son muy diferentes debido a las distintas características que se desea extraer de la señal y a la mayor precisión requerida para la observación de radiofuentes. Entre las principales propiedades que debe tener un receptor para radioastronomía, están el bajo ruido y la gran estabilidad en ganancia de las etapas de amplificación

pues estas características determinan la capacidad de detección de señales débiles ¹.

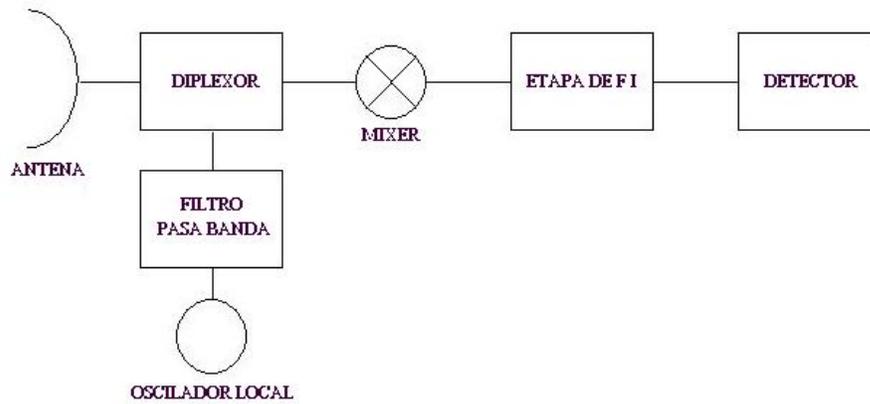


Figura 2.1: Esquema básico de un radiotelescopio. Además de los elementos que aparecen en el gráfico se debe considerar la existencia de un sistema de control de posición para la antena y otro para el oscilador local y el detector. Estos no han sido dibujados para simplificar el diagrama.

El receptor coherente baja la frecuencia conservando las relaciones de fase de la señal, lo que permite obtener una réplica de la señal de entrada pero a una frecuencia más baja que la original. Debido al enorme desarrollo de la electrónica a bajas frecuencias es que es posible medir con mucha precisión, la potencia, el contenido espectral y otras características como la forma de la onda emitida por la radiofuente. Los receptores (detectores) que no

¹Se puede probar ([5], [13], [18]) que esta resolución está dada por una expresión de la forma $\Delta T_{min} = \frac{KT_{sis}}{\sqrt{\Delta\nu t}}$. Donde ΔT_{min} es la mínima variación de la temperatura de ruido total que el instrumento puede distinguir, T_{sis} es la temperatura de ruido del receptor, $\Delta\nu$ es el ancho de banda del sistema, t es el tiempo de integración y K es una constante que depende de la forma de la banda de paso, la información que desea obtenerse de la medición y del tipo de receptor usado, pero que usualmente es del orden de 1 o 2. Una variación de la temperatura de ruido tiene un efecto equivalente en la respuesta final del receptor que una variación de ganancia dada por $\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta G}{G}$. Es por esta razón que la ganancia del receptor debe ser estable durante el tiempo de integración requerido. Finalmente se debe mencionar que en presencia de variaciones de ganancia aleatorias con una distribución Gaussiana el límite de sensibilidad del instrumento está dado por $\Delta T_{min} = KT_{sis} \sqrt{\frac{1}{\Delta\nu t} + \left(\frac{\Delta G}{G}\right)^2}$. La discusión anterior establece claramente la importancia de la estabilidad de ganancia y el bajo nivel de ruido que un receptor debe poseer para detectar señales débiles.

conservan la fase se denominan incoherentes, este es el caso de un radiotelescopio que sólo mide la potencia de la señal de entrada. La mayoría de los radiotelescopios en uso utilizan receptores del tipo coherente, encontrándose la mayor diferencia en el detector o *back-end*, el que depende de las propiedades de la señal que deseen medirse.

Otro punto importante de mencionar es que un receptor como el mostrado en la figura 2.1 permite la medición de sólo un estado de polarización de la onda electromagnética incidente. Para medir polarizaciones ortogonales se debe hacer uso de un dispositivo que permita separar ambas polarizaciones (diplexor de polarización) y utilizar dos receptores, uno para cada estado de polarización.

2.1.1.1. *Front-end*

El *front-end*, la primera sección del radiotelescopio, es una de las más importantes y la que difiere más entre instrumentos operando a distintas frecuencias. Debido a las distintas tecnologías utilizadas, esta sección es muy distinta si se trata de un receptor de ondas centimétricas, milimétricas o sub-milimétricas. Las diferencias se deben, además de las razones tecnológicas, a distintos requerimientos de ruido que son incluso determinados por razones de tipo físico ².

A continuación se explica brevemente la función de cada uno de los bloques que componen el *front-end*.

Antena y antena alimentadora (*feed antenna*): La antena tiene por función recolectar la radiación electromagnética proveniente de las radiofuentes en estudio. El diseño y construcción de la antena dependen enormemente de las frecuencias involucradas. Entre las antenas más usadas se encuentran el reflector parabólico y el dipolo, sin embargo se han construido radiotelescopios con los más diversos tipos de antenas como helicoidales, yagi, esféricas, etc. [5]. La elección de una antena en particular depende fuertemente del rango de frecuencias

²En [18] se demuestra que los receptores coherentes tienen un límite fundamental de ruido determinado por una variación del principio de incertidumbre de Heisenberg. Este límite de ruido está dado por $T_{\text{minimo}} = \frac{h\nu}{k}$. A frecuencias bajas este límite es pequeño, por ejemplo a 2.6 mm (115.3 GHz) es 5.5 K, pero en el rango óptico es cercano a 10^4 K. Para el caso de los receptores incoherentes este límite no existe.

involucrado. El reflector parabólico es una de las más usadas, debido entre otras cosas a que es útil en un amplio rango de frecuencias lo que la hace muy apropiada para la espectroscopía y permite utilizar el radiotelescopio en un gran rango de frecuencias simplemente cambiando los restantes componentes del *front-end*.

Para recolectar la radiación electromagnética la antena parabólica concentra la onda incidente (que se puede considerar plana, debido a la gran distancia a los objetos astronómicos) en un punto denominado foco. En este punto se debe usar una antena alimentadora para acoplar la radiación a una guía de onda o línea de transmisión. Los tipos más usados son el dipolo y la bocina o *feed horn*. En la mayoría de los casos esta antena alimentadora se encuentra en un foco secundario, siendo necesario reflejar la radiación hasta ese punto por medio del uso de un reflector secundario hiperbólico. Esta configuración, denominada Cassegrain, mejora el funcionamiento de la antena, permitiendo con un diseño adecuado alcanzar objetivos como reducir los lóbulos laterales y disminuir el tamaño del haz principal. El diseño de antenas es un tema bastante complicado que implica desarrollos teóricos y experimentales. Una revisión de los principales aspectos de su diseño se puede encontrar en [13], [5], [19].

Diplexor: El diplexor tiene por objetivo el alimentar a la misma guía de onda (o línea de transmisión) las señales provenientes de la antena y del oscilador local, las cuales tienen frecuencias diferentes. Esto se puede hacer por medio de filtros que tienen por objetivo el combinar ambas señales, impidiendo que el ruido del oscilador local se confunda con señales reales e introduciendo las menores pérdidas posibles. Lo anterior es muy importante pues las señales de interés en radioastronomía tienen niveles de potencia muy bajos. Además de los filtros se puede usar acopladores direccionales (4.4.9) y los llamados diplexores de anillo resonante, como el que se usa en este radiotelescopio (2.3.1). Los diplexores implementados con filtros o anillos resonantes proveen filtrado del ruido presente en el oscilador local, mientras que los que usan acopladores direccionales requieren del uso de filtros externos.

Oscilador local: El oscilador local es el encargado de generar la frecuencia de referencia que es combinada en el mixer con la señal proveniente de la radiofuente (detalles en la sección referente al mixer). Los requerimientos y tecnologías utilizadas para su implementación se

describen en forma detallada en el capítulo 3.

Mixer: El mixer es el dispositivo que realiza la conversión de frecuencia en un receptor coherente. El mixer se compone además del dispositivo que realiza la conversión, de las redes de acoplamiento con la radiofrecuencia y la frecuencia intermedia, las cuales tienen por objetivo optimizar la transferencia de potencia entre las distintas partes del receptor. Cualquier dispositivo que tenga una relación no lineal entre el voltaje de entrada y la corriente de salida puede ser usado para este efecto, sin embargo para derivar las propiedades básicas se puede considerar una no linealidad cuadrática de la forma $I = \alpha U^2$.

La entrada al mixer (U) es la suma de la señal de entrada a la antena $E \sin 2\pi f_s t + \delta_s$ y la señal del oscilador local $V \sin 2\pi f_L t + \delta_L$ (las cuales son combinadas en el diplexor). Si se desarrollan las expresiones se encuentra que la corriente tiene una componente DC, una segunda armónica de la señal de entrada y otra del oscilador local, una componente de frecuencia igual a $f_s + f_L$ y otra de frecuencia $f_s - f_L$.

La señal con frecuencia igual a $f_s - f_L$ tiene una amplitud proporcional a α , E y V , por lo que es una muy buena representación de la señal de entrada a una frecuencia más baja. Esta señal puede ser separada de las otras y recuperada por medio de la utilización de un filtro pasa banda apropiado.

Conviene notar que al realizar la conversión, las frecuencias f_{s1} (*Upper sideband*) y f_{s2} (*Lower sideband*), con $f_L - f_{s2} = f_{s1} - f_L$, son combinadas en la misma frecuencia intermedia. Si la información de interés se encuentra en f_{s1} , la frecuencia f_{s2} sólo agregará ruido a las mediciones. Cuando se toman medidas para eliminar la frecuencia no deseada se dice que el receptor opera en SSB (*Single Sideband*), de no tomarse medidas se denomina DSB (*Double Sideband*).

Existen distintos tipos de mixers, los más usados son el diodo Schottky y SIS. El diodo Schottky se compone de una juntura entre un metal y un semiconductor. Esta configuración tiene tiempos de respuesta más rápidos que un diodo semiconductor, por lo que puede ser usado a frecuencias de GigaHertz (banda milimétrica). El SIS se compone de una juntura superconductor-aislador-superconductor y su funcionamiento se basa en efectos relacionados con la superconductividad, por lo que debe ser operado a una temperatura de 4.2 K (helio

líquido). Los principios físicos y sus aplicaciones a radioastronomía son presentados en [18], [17], [15].

Además de los componentes mencionados, se suele incluir una etapa de preamplificación entre la antena y el mixer. Esta etapa tiene por objetivo disminuir la contribución de ruido generado por el mixer y compensar las pérdidas de conversión que podrían existir en él, aumentando la potencia de la señal de entrada. En un sistema con varias etapas ruidosas en cascada la primera etapa es la que hace la mayor contribución, por lo que debe ser de bajo ruido, generalmente enfriada para disminuirlo. En la actualidad la mejor solución disponible para esta etapa de preamplificación son los amplificadores *HEMT* (*High Electron Mobility Transistor*). Estos dispositivos son útiles hasta frecuencias de 110 GHz ([18], [1], [17]).

2.1.1.2. Frecuencia Intermedia y Detector o *Back-End*

El objetivo de la conversión de frecuencia es poder trabajar con frecuencias menores donde la electrónica es más fácil de implementar y es posible realizar con alta precisión una gran cantidad de procesos de detección con la señal. La sección del receptor que está inmediatamente después del *front-end* se denomina etapa de Frecuencia Intermedia y es más o menos similar en todos los receptores. Usualmente se compone de una o más etapas de amplificación, filtrado y conversión de frecuencia.

En la última etapa, denominada *back-end* está el detector que permite medir alguna propiedad de la señal, ya sea ésta la potencia, el contenido espectral o algo más específico como la forma y el período de los pulsos para el caso de las observaciones de pulsares. Para realizar mediciones de potencia existen diversos dispositivos como el *square-law detector*, que es un elemento cuyo voltaje de salida es proporcional al cuadrado del voltaje de entrada, es decir proporcional a la potencia recibida. Bajo condiciones apropiadas de niveles de señal y polarización, este elemento puede ser implementado por medio de un diodo. Otro dispositivo usado para medir potencia es el bolómetro que hace uso del cambio de temperatura experimentado por una resistencia cuando esta absorbe radiación. Debido a que los principios de funcionamiento no son muy dependientes de la frecuencia, estos dispositivos no permiten

obtener una gran resolución espectral, por lo que son usados en la observación de la emisión de continuo con un ancho de banda grande.

Para medir el contenido espectral se usan los llamados espectrómetros que pueden ser de diversos tipos. El más simple de todos los espectrómetros se puede construir usando un banco de filtros (espectrómetro multicanal), estos son muy difíciles de construir pues se debe lograr que todos los canales tengan la misma respuesta pasabanda (obviamente con distinta frecuencia central) y que tengan una estabilidad idéntica para poder realizar integraciones largas. Existen otros tipos de espectrómetros que realizan un análisis de Fourier de la señal (espectrómetro de transformada de Fourier digital), los que usan propiedades de la correlación de señales (espectrómetro de autocorrelación) y otros tipos más sofisticados como los espectrómetros acusto-ópticos (AOS - *Acousto-Optical Spectrometer*) que hacen uso del efecto de difracción de un haz de radiación (laser generado en el espectrómetro) por un cristal en el que se propagan ondas ultrasónicas que dependen de la señal cuyo contenido espectral se desea medir. Una descripción completa de estos dispositivos se da en el capítulo 4 de [18].

2.2. Descripción general del radiotelescopio

El telescopio es del tipo Cassegrain con un reflector parabólico de 1.2 m de diámetro, un reflector secundario hiperbólico de 18.8 cm y una razón $f/D = 3,79$. El primario, de una sola pieza de aluminio, es limitado por difracción, y tiene una exactitud superficial mejor que $\lambda/100$ a 2.6 mm. La montura puede cambiar de posición en 5° en menos de 1 s, por lo que se puede usar posiciones de referencia para *position switching*³, bastante lejos del ecuador Galáctico en un ciclo de solo 30 s.

Para chequear la óptica y el alineamiento del telescopio, se midió el diagrama de radiación de la antena (ver figura 2.2) usando un transmisor ubicado en Cerro Morado, a 3 km de distancia, en el campo lejano de la antena según el criterio $6D^2/\lambda$. El ancho medido del lóbulo principal a 3 dB (FWHM - *Full Width Half Maximum*) es de 8.8 minutos de arco a

³*Position switching* es una técnica de observación en que se observan alternadamente la fuente de interés y una posición donde no hay emisión en la línea observada, de esta manera se puede conocer que parte de la respuesta del instrumento se debe a la presencia de la fuente.

Antena	1.2 m. Cassegrain
Exactitud superficial	20 μm
Ancho del haz	8.8 minutos de arco (a 115.3 GHz)
Ancho de banda	128 MHz, 25.6 MHz
Resolución espectral	0.5 MHz, 0.1 MHz
Temperatura ruido	380 K (SSB)

Tabla 2.1: Especificaciones del radiotelescopio. El ancho de banda y la resolución espectral dependen del espectrómetro usado, por eso se tiene dos valores para cada una de estas cantidades (ver 2.3.3).

115.3 GHz, con lóbulos laterales a más de 18 dB bajo el lóbulo principal [3], [2].

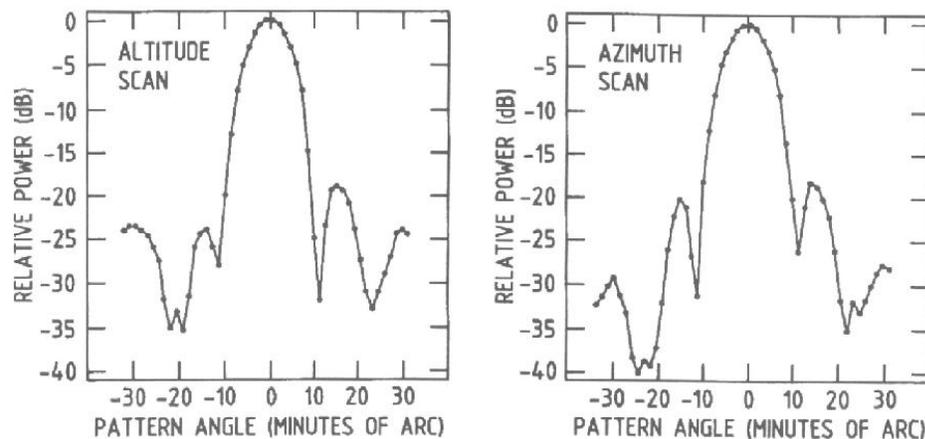


Figura 2.2: Diagrama de radiación del radiotelescopio, medido con un transmisor a 3 km en el campo lejano de la antena [3].

El telescopio se encuentra dentro de un domo cuya abertura está completamente cubierta por una delgada pantalla de *griffolyn*, casi totalmente transparente a 2.6 mm. La vista general del telescopio y un esquema del sistema de control de éste se muestran en las figuras 2.3 y 2.4.

El receptor se puede dividir básicamente en una primera etapa enfriada con nitrógeno líquido (77 K) donde se realiza la detección de la señal inicialmente a 115.3 GHz correspondiente a la transición del $CO(J = 1 - 0)$ (Se puede sintonizar entre 108 GHz y 118 GHz) y se hace la primera conversión a una frecuencia intermedia de 1390 MHz. Después de esto la señal pasa por una primera etapa de frecuencia intermedia donde es amplificada y finalmente convertida a una segunda frecuencia intermedia de 150 MHz. Esta señal centrada en 150 MHz llega finalmente a un espectrómetro multicanal donde se puede obtener su espectro. La temperatura de ruido *single sideband* típica del sistema es de 380 K [3].

2.3. Sistema receptor

Para explicar el funcionamiento del receptor y dar el detalle de sus componentes se presenta un diagrama de bloques de éste (figura 2.5). A continuación se da una breve descripción de las distintas partes del receptor.

2.3.1. Primera etapa (*front-end*)

Esta etapa se encuentra enfriada a 77 K, por medio de nitrógeno líquido en un termo. La radiación captada por el espejo primario, es reflejada en el secundario y capturada por el *feed horn*. Luego de esto la señal de entrada es mezclada con la señal del oscilador local por medio de un diplexor de anillo resonante (*resonant ring injection filter*)⁴ con una pérdida de señal de 0.2 dB. Esta señal combinada pasa al diodo Schottky (*double sideband Schottky-barrier diode mixer*) que tiene una temperatura de ruido de 110 K y pérdidas de conversión de 5.2 dB, donde se realiza la primera conversión a la frecuencia intermedia de 1390 MHz. A continuación se usa un transformador de cuarto de onda para ajustar las impedancias del mixer y el amplificador *FET* con una temperatura de ruido de 15 K, ganancia $30 \pm 0,5$ dB en un ancho de banda de 150 MHz. Los dos últimos bloques corresponden a la etapa de frecuencia intermedia, sin embargo se incluyen en esta etapa por encontrarse dentro del termo

⁴El diplexor de anillo resonante es descrito en [10]. Este artículo describe la configuración original del gemelo de éste radiotelescopio. Aunque estos tienen algunas diferencias su lectura es muy recomendable.

a 77 K.

2.3.2. Primera etapa de frecuencia intermedia

Esta segunda etapa trabaja a una frecuencia de 1390 MHz y se encuentra a temperatura ambiente. La señal de entrada a esta etapa es amplificada en 30 dB. Luego de la amplificación la señal pasa por un filtro pasa-banda centrado en 1390 MHz y con un ancho de banda a 3 dB de 116 MHz. A la salida del filtro pasa-banda se ubica un aislador que impide que la potencia reflejada en el segundo mixer se devuelva generando oscilaciones indeseadas en el sistema o respuestas espúreas en el diodo Schottky del mixer.

2.3.3. Segunda etapa de frecuencia intermedia y espectrómetro

En esta tercera etapa se realiza una segunda conversión a la frecuencia intermedia de 150 MHz. La señal del oscilador local se obtiene de un oscilador de cristal a 1.24 GHz y la señal a la salida de este mixer es nuevamente amplificada en 30 dB, para finalmente llegar al espectrómetro. Hasta 1988 el espectrómetro era un banco de filtros de 256 canales, cada uno con un ancho de banda de 500 kHz. Lo anterior permitía una resolución de 1.3 km s^{-1} , y un rango espectral ⁵ de 128 MHz o 333 km s^{-1} .

En 1988 este espectrómetro fue trasladado al radiotelescopio gemelo y el espectrómetro del radiotelescopio pasó a ser un banco de filtros de 256 canales de 100 kHz de ancho, lo que se traducía en un ancho de banda total de 25.6 MHz o un rango de velocidades entre 66 km s^{-1} y 70 km s^{-1} , dependiendo de la frecuencia. En el marco de una cooperación con el *Max-Planck-Intitut für Radioastronomie (MPIfR)* durante un par de años se operó un espectrómetro acusto-óptico que permitía una resolución de 1.07339 MHz y un ancho de banda 274.8 MHz. Este AOS regresó al MPIfR una vez terminado el proyecto [11].

En el Radio Observatorio de Maipú, dependiente del Departamento de Astronomía, se rediseñó y reconstruyó completamente un espectrómetro multicanal consistente en 2×128

⁵En radioastronomía espectroscópica usualmente se habla de rango de velocidades en lugar de rango de frecuencias. Estas dos cantidades están relacionadas por medio del efecto Doppler, dado por la expresión $\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta v}{c}$. Donde c es la velocidad de la luz.

canales de 1 MHz cada uno, es decir una resolución de 2.6 km s^{-1} y un rango espectral de 333 km s^{-1} . Este receptor multicanal (originalmente construido en el MPIfR, fue enviado a Arizona, USA, desde donde se rescató para Maipú) fue usado durante algún tiempo en el radiotelescopio milimétrico de Cerro Tololo.

La figura 2.6 muestra un espectro típico de los obtenidos usando el radiotelescopio. La escala horizontal representa la velocidad del gas molecular con respecto al estándar de reposo local (LSR - *Local standar of rest*) que se define como la velocidad de un punto ubicado instantaneamente en la posición del Sol y que se mueve en orbita circular con respecto al centro de la Vía Láctea ⁶. La escala vertical es la temperatura de antena, el asterisco indica que aunque se han corregido algunos efectos como la atenuación de la atmósfera, pérdidas resistivas y otras, no se trata de la temperatura de radiación final. El detalle del significado de esta temperatura y la forma de llegar al resultado final se dan en [2].

⁶Esto corresponde a la definición dinámica. Existe otra definición, denominada cinemática, que se basa en el movimiento promedio de las estrellas en la vecindad solar.

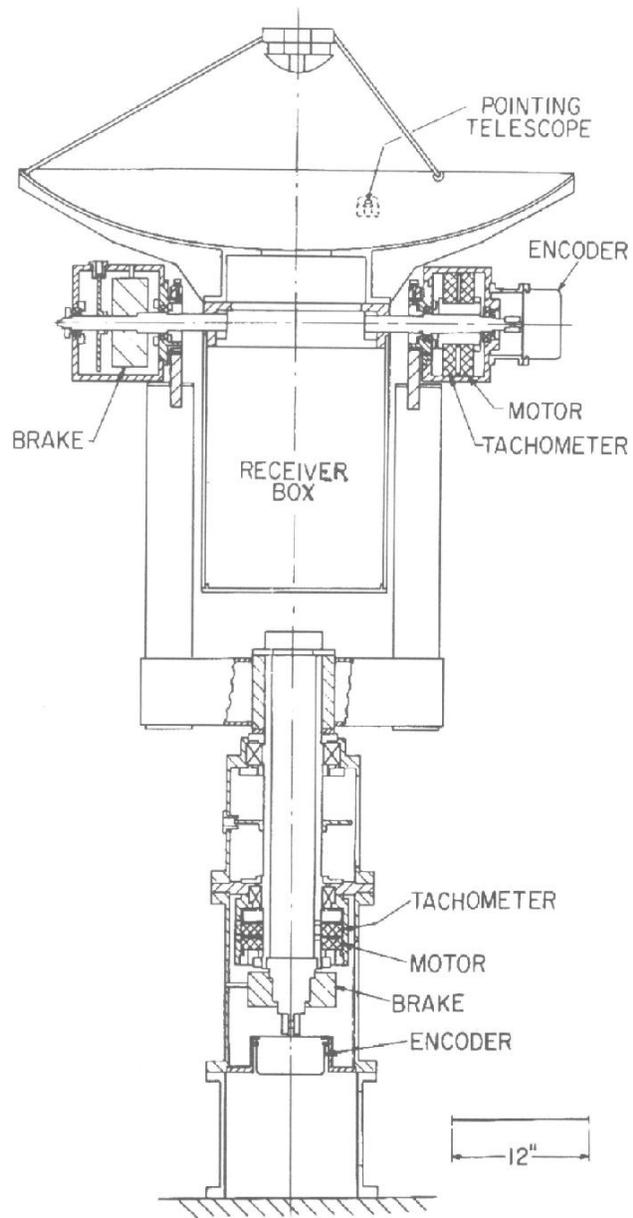


Figura 2.3: El radiotelescopio tiene una montura alt-azimutal. En la figura se muestran los motores, frenos, *encoders* y la caja del receptor, donde se ubican el *front-end* y la etapa de frecuencia intermedia.

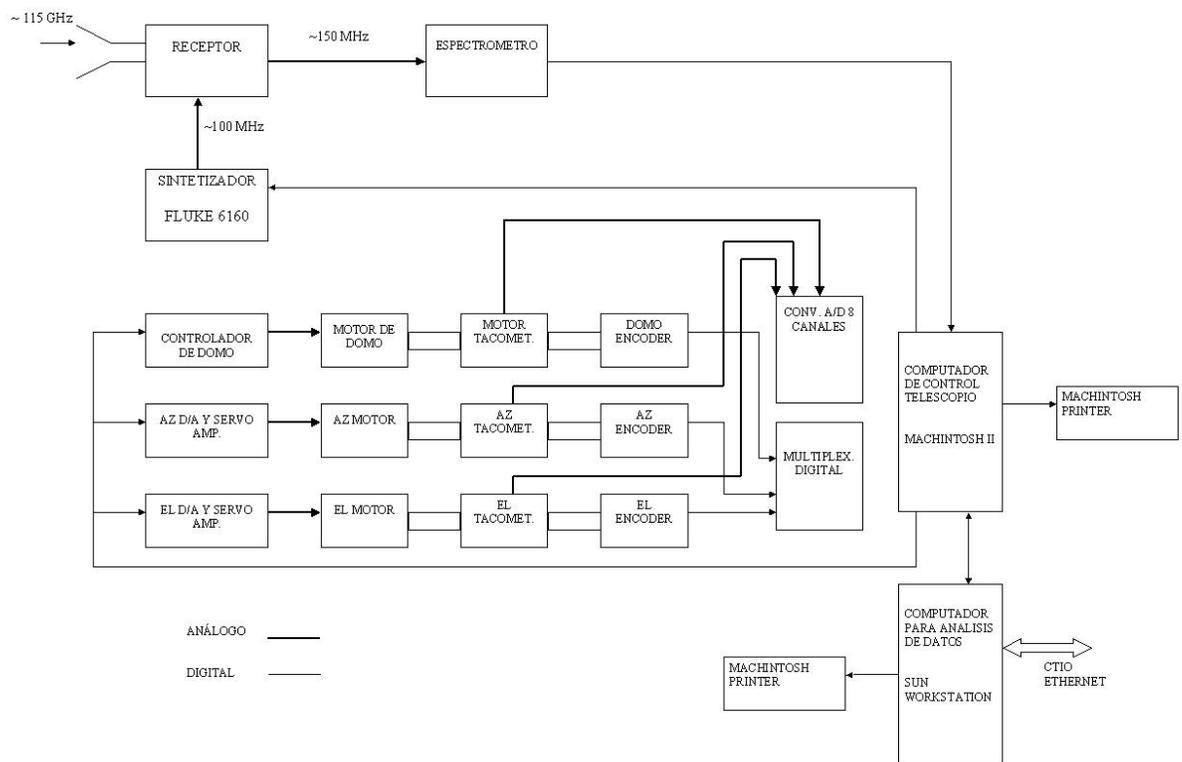


Figura 2.4: Diagrama de bloques del radiotelescopio. El sistema es controlado por un computador Machintosh II, el que se encarga del control de posición del telescopio, del control de frecuencia del oscilador local por medio de un sintetizador de frecuencia y de la adquisición de datos. Se dispone además de otro computador para la reducción de los datos. Adaptación del diagrama presentado en [7] y de las modificaciones realizadas al sistema informadas en [11]

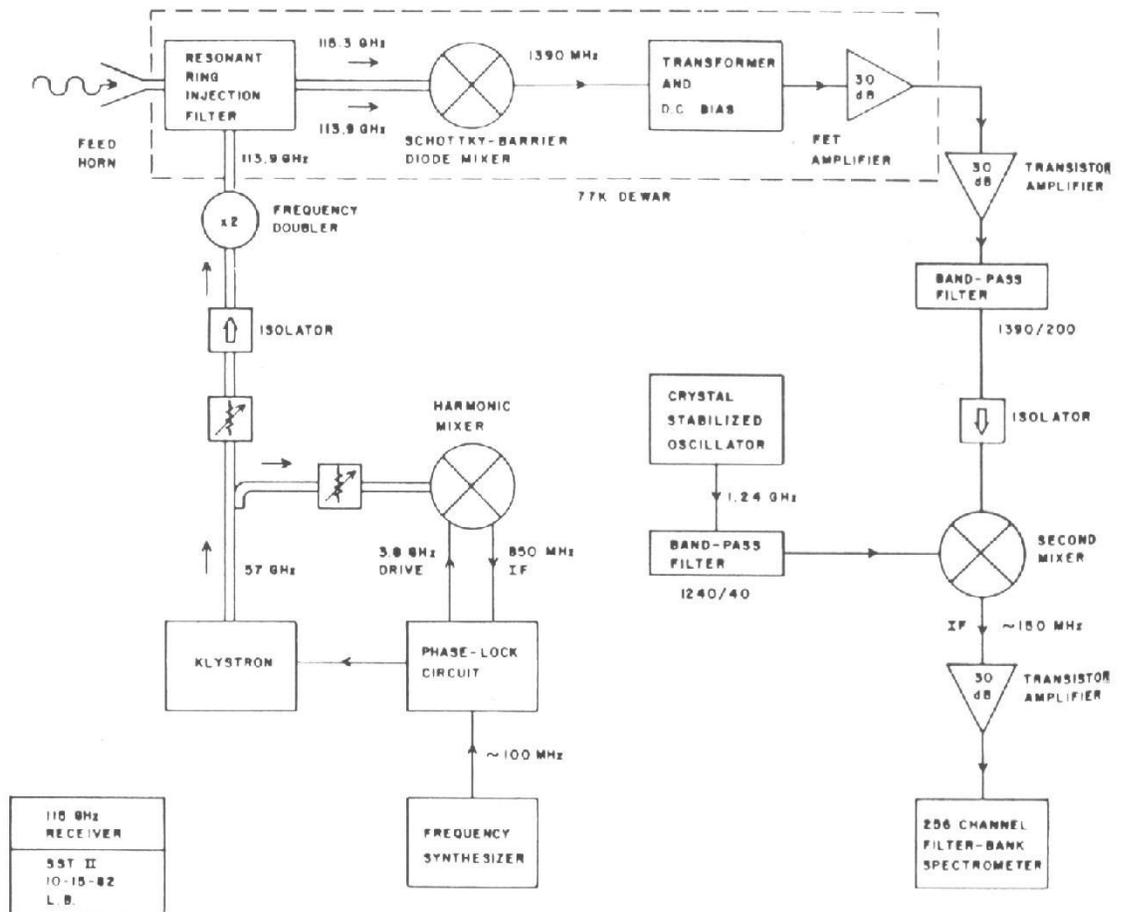


Figura 2.5: Diagrama de bloques del receptor del radiotelescopio [2].

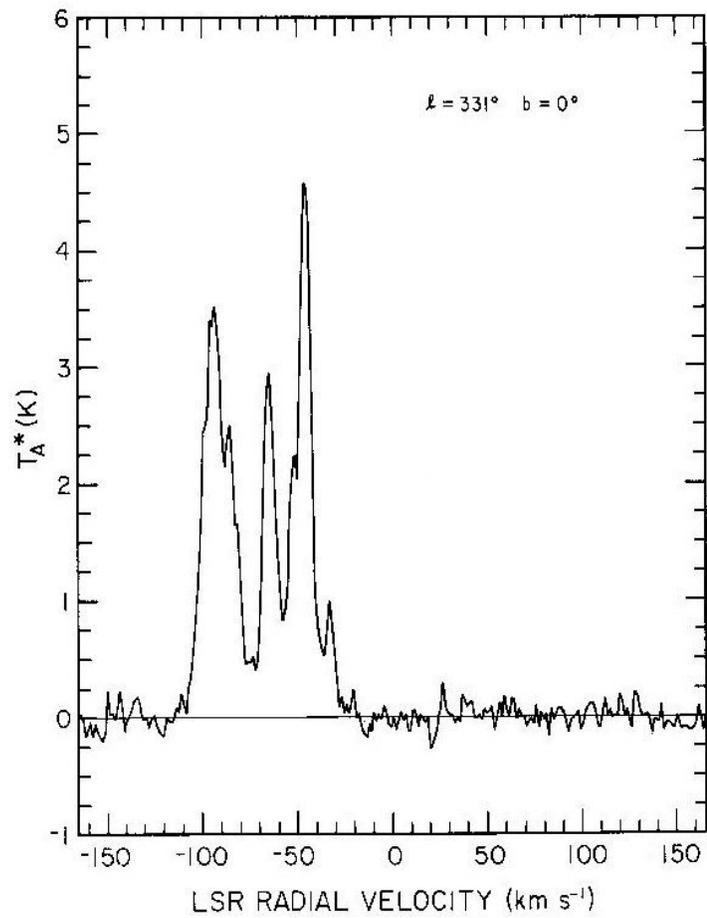


Figura 2.6: Espectro de CO típico obtenido con el radiotelescopio [2].

Capítulo 3

Oscilador Local

El oscilador local de un receptor coherente o superheterodino es uno de los componentes más importantes. Este es el encargado de generar la frecuencia de referencia que permite obtener del mixer una señal de salida de más baja frecuencia pero con iguales características a la señal de entrada al receptor. El oscilador local se compone de dos elementos principales, estos son la fuente de radiofrecuencias y el *Phase Lock Loop* que permite realizar el control de frecuencia. En este capítulo se da una descripción general de ambos bloques componentes, entregándose algunos detalles sobre el funcionamiento de las tecnologías usadas en este radiotelescopio tanto la original como la del nuevo oscilador local ¹.

Debido a que el oscilador local tiene un papel central en el funcionamiento del receptor es que debe cumplir con exigentes características para asegurar el correcto funcionamiento del sistema. Como se vió en el capítulo anterior (sección 2.1.1) la potencia de la señal a la salida del mixer es directamente proporcional a la potencia del oscilador local, es por esto que cualquier variación en la potencia de salida del oscilador local generará una variación en la potencia de frecuencia intermedia, lo que puede mal interpretarse como una variación de la potencia de la fuente. Además de este problema con la potencia de salida se requiere que la frecuencia de salida sea igualmente estable y muy precisa, pues cualquier variación de la frecuencia de salida puede llevar a confusión debido a que puede ser interpretada como un movimiento de la fuente, debido a que las diferencias de frecuencia son interpretados

¹La descripción de los principios de funcionamiento esta basada principalmente en [8]

como velocidades relativas (este es un problema realmente serio en la observación de líneas espectrales).

Actualmente existen una gran variedad de tecnologías de oscilador local disponibles. La elección de una en particular depende, entre otras cosas, de los niveles de potencia, ruido y el rango de frecuencia requerido. No está dentro del alcance de este trabajo referirse a las múltiples alternativas existentes, sin embargo se discutirá con cierto detalle la tecnología usada en el oscilador local original y la del nuevo oscilador local. El lector interesado puede encontrar una revisión de las diferentes tecnologías y una gran cantidad de referencias en [8], [16]. Para una revisión de las tendencias modernas en radioastronomía se recomienda revisar los memos del proyecto ALMA ² que describen las tecnologías que serán usadas en su implementación.

3.1. Oscilador local original

En este telescopio se realizan dos conversiones de frecuencia, la primera requiere de un oscilador local funcionando típicamente a 57 GHz y un multiplicador X2 que permite obtener una frecuencia de 113.9 GHz. La segunda conversión requiere de un oscilador a 1.24 GHz. Estas frecuencias corresponden a las necesarias para observar la línea de emisión $J = 1 - 0$ de CO, modificando la primera se podría eventualmente observar otras transiciones. En este trabajo se reemplaza el oscilador local que genera la frecuencia de referencia para la primera conversión, por lo que de aquí en adelante cuando se haga referencia al oscilador local, debe entenderse que se trata de éste.

Originalmente el oscilador local del receptor, correspondía a un oscilador del tipo Klystron que generaba una frecuencia de 57 GHz y una potencia cercana a 25 mW. El Klystron es un tipo de oscilador de tubo de microondas que funciona por medio de un mecanismo de modulación de la velocidad de un haz de electrones y realimentación (más detalles en 3.1.1.1). En la figura 2.5, se aprecia la estructura que tenía el antiguo oscilador local. El Klystron generaba una frecuencia de 57 GHz, parte de la potencia de esta señal seguía su camino hasta

²Estos memos estan disponibles en el sitio web del proyecto, www.alma.nrao.edu

el diplexor de anillo resonante y una parte de ella era desviada por medio de un acoplador direccional hasta un *harmonic mixer* donde se obtenía una señal de frecuencia intermedia a 850 MHz que servía de realimentación para un *Phase Lock Loop* que permitía estabilizar la frecuencia de salida del Klystron al valor de 57 GHz. Los detalles del funcionamiento de este sistema se pueden ver en [14].

3.1.1. Características del Klystron

3.1.1.1. Principios de funcionamiento

Un esquema básico de este tipo de oscilador se muestra en la figura 3.1. El principio de funcionamiento es el siguiente: se genera un haz de electrones que es acelerado para hacerlo pasar por una cavidad resonante. En la cavidad resonante se genera, como respuesta a una señal de corriente alterna acoplada a la cavidad, una onda que modifica la velocidad de los electrones del haz (modulación de velocidad).

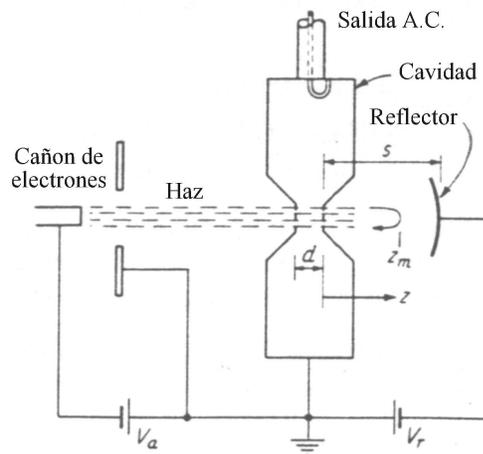


Figura 3.1: Esquema básico de un Klystron [8]

Esta onda tiene la misma frecuencia que el campo en la cavidad y una velocidad un poco menor a la del haz. El haz modulado en velocidad sigue su camino hacia el reflector

que está a potencial negativo para frenar el haz y eventualmente hacer que éste cambie su dirección retornando a la cavidad. Este mecanismo permite realimentar la señal de corriente alterna que moduló el haz. Dependiendo de la fase y la magnitud del acoplamiento entre el haz y la cavidad se puede obtener oscilaciones autosostenidas en el Klystron. Una descripción completa y detallada de este dispositivo se puede encontrar en [8].

3.1.1.2. Características particulares del Klystron usado en el oscilador

El Klystron usado en el receptor es el modelo VRE-2103B19, fabricado por Varian, Canada. En condiciones de operación típicas se usa un voltaje de haz de 1500 V, y un voltaje de reflector de 500 V con respecto al voltaje de haz. Debido a que se usa una cavidad resonante el Klystron es capaz de generar frecuencias en un pequeño rango (ver figura 3.2). Para evitar el calentamiento del Klystron, éste es enfriado por medio de circulación de agua.

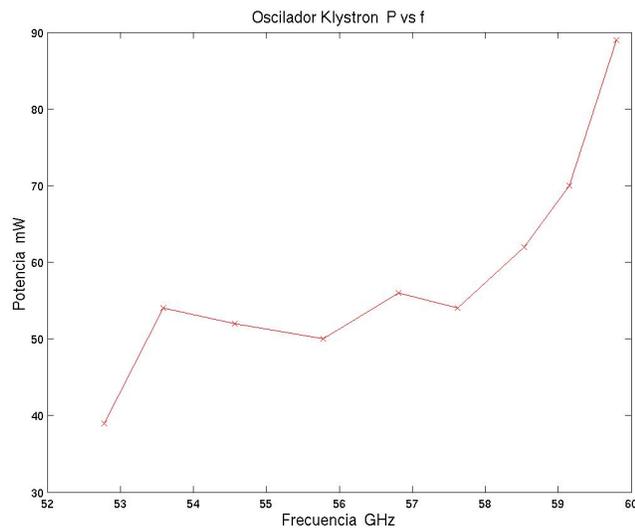


Figura 3.2: Potencia de salida versus frecuencia para el Klystron usado en el receptor.

3.2. Oscilador Gunn

3.2.1. Principios de operación

Un oscilador Gunn, se compone básicamente de un dispositivo semiconductor (dispositivo Gunn) acoplado a una cavidad resonante. El principio de funcionamiento se basa en el hecho que la estructura de bandas de algunos semiconductores (GaAs, InP o CdTe) tiene la banda de conducción dividida en dos bandas muy cercanas, una de ellas de *baja energía - alta movilidad* y la otra de *alta energía - baja movilidad*. Cuando hay más electrones en la banda de *baja energía - alta movilidad* la conductividad es mayor, que cuando hay más en la banda de *alta energía - baja movilidad*, pues la conductividad se relaciona directamente con la movilidad de los portadores de carga (Una discusión completa sobre las propiedades básicas de semiconductores se puede encontrar en [1]). En términos de comportamiento como elemento de circuito se tiene que la característica corriente-voltaje de un semiconductor de este tipo es como la de la figura 3.3.

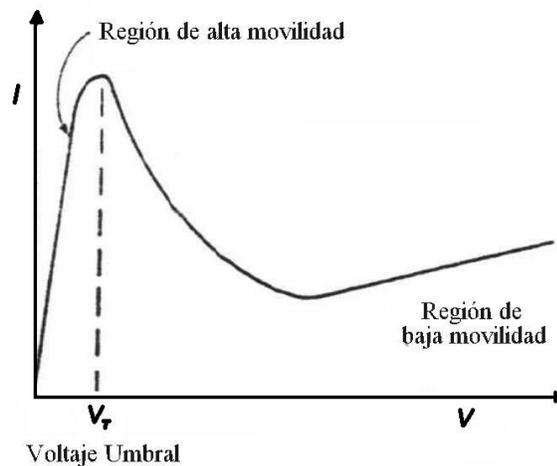


Figura 3.3: Característica corriente-voltaje de un dispositivo Gunn [8].

En la figura se tiene una zona de resistencia diferencial negativa, que se forma cuando los electrones pasan de la banda de baja energía a la de alta, disminuyendo la resistencia.

Hay básicamente dos modos de operación que generan oscilaciones, el primero de los cuales se denomina modo de tiempo de tránsito (*transit-time mode*) o *modo Gunn* y consiste en aplicar al dispositivo un voltaje mayor que el umbral, de este modo se forma un dominio dipolar (figura 3.4) que separa una región de alta movilidad de una de baja movilidad. Este dominio viaja desde el cátodo al ánodo donde se destruye. Este proceso se repite sucesivamente generando oscilaciones cuyo período está dado por el tiempo de tránsito del dominio dipolar. El principal problema de este modo de operación es que la frecuencia no puede ser controlada externamente y que no es muy eficiente en términos de generación de potencia.

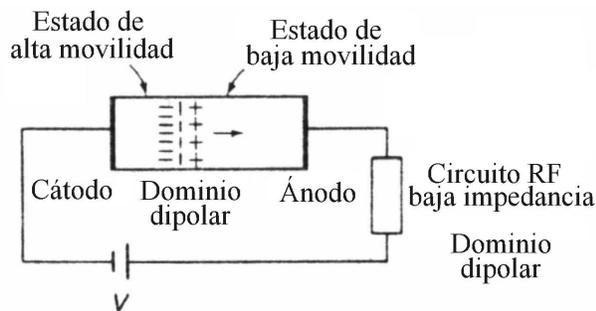


Figura 3.4: Dispositivo Gunn en modo de tiempo de tránsito [8].

El segundo modo de operación se denomina modo de carga espacial limitada (*limited-space-charge (LSA)*) y consiste en acoplar el dispositivo Gunn a un circuito resonante con una frecuencia varias veces mayor que la frecuencia de oscilación del modo de tiempo de tránsito, de esta forma el dominio dipolar no tiene tiempo de formarse, por lo que el comportamiento del dispositivo Gunn es esencialmente el de un dispositivo de resistencia negativa. En este modo de operación el dispositivo se polariza con un voltaje ligeramente mayor al umbral, de esta forma genera oscilaciones con una amplitud tal que cubre toda la zona donde la resistencia es negativa (figura 3.5).

Algunas configuraciones usadas en la práctica se muestran en las siguientes figuras. Ambas corresponden a la operación en el modo LSA, pues éste permite realizar el control de la frecuencia de las oscilaciones.

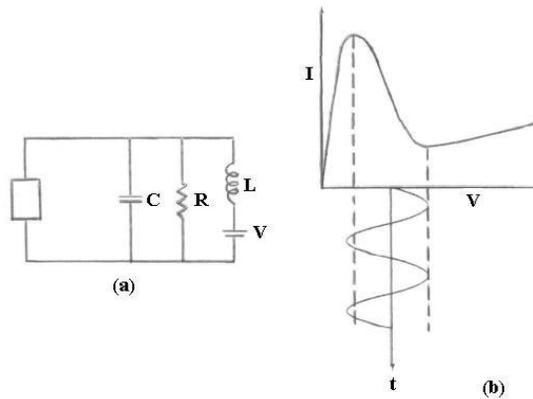


Figura 3.5: Dispositivo Gunn en modo de carga espacial limitada [8].

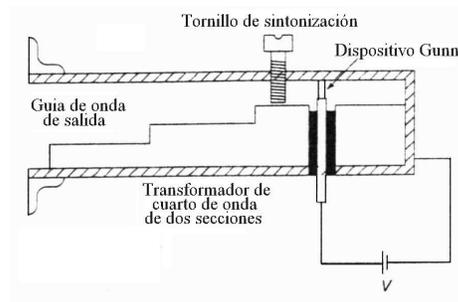


Figura 3.6: Ejemplo de configuración de oscilador Gunn [8].

La primera configuración (figura 3.6) permite ajustar la frecuencia de oscilación por medio de un tornillo. En esta configuración los transformadores $\lambda/4$ permiten ajustar la impedancia de la cavidad a la salida. La segunda configuración (figura 3.7) permite ajustar electrónicamente la frecuencia de oscilación por medio de un diodo varactor (dispositivo de capacidad variable y controlable).

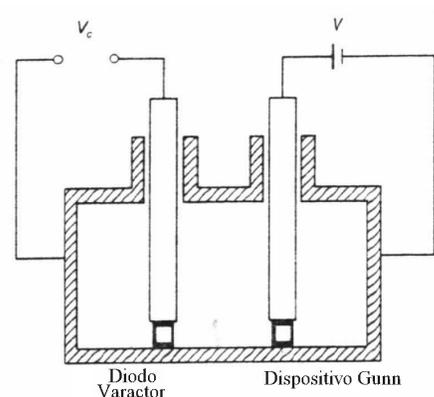


Figura 3.7: Otro ejemplo de configuración de oscilador Gunn [8].

3.2.2. Características

El oscilador Gunn que se instalará en el receptor fué fabricado por J. E. Carlstrom Co., y es capaz de entregar directamente la frecuencia de 113.9 GHz, con un nivel de potencia cercano a los 20 mW. Esto lo hace apropiado para la sintonización del receptor a 115.3 GHz. El oscilador Gunn es capaz de oscilar en frecuencias entre 85 GHz y 116 GHz entregando una potencia de salida mayor a 10 mW (ver figura 3.8). Esto último permitirá la observación de un gran número de transiciones moleculares entre las cuales se encuentran las mencionadas en la introducción.

El ajuste de frecuencia de este oscilador se realiza por medio de un tornillo micrométrico y un voltaje de polarización del orden de 10 V, 170 mA (figura 3.9). El tornillo permite hacer una selección gruesa de la frecuencia de salida, mientras que el voltaje de bias permite variar la frecuencia electrónicamente en valores del orden de 100 MHz cada 0.2 V (ver especificaciones del fabricante en apéndice D). El oscilador cuenta con un segundo tornillo micrométrico que permite optimizar el acoplamiento entre la cavidad resonante y la salida, aumentando la potencia de salida.

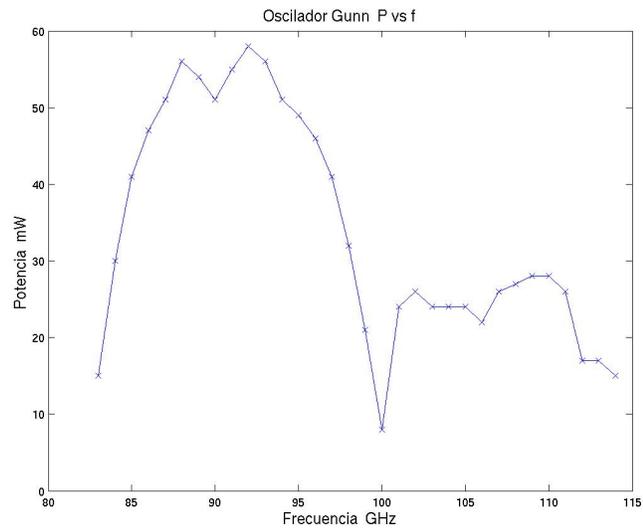


Figura 3.8: Potencia de salida versus frecuencia para el oscilador Gunn de J. E. Carlstrom Co. Datos reportados por el fabricante.



Figura 3.9: Oscilador Gunn de J. E. Carlstrom Co.

3.3. Comparación con el Klystron

El oscilador Gunn tiene una serie de ventajas en comparación con el Klystron. La principal de ellas está relacionada con el rango de frecuencias de oscilador local que se puede

obtener con cada uno de ellos. Mientras que con el Klystron sólo se puede generar frecuencias de oscilador local entre 108 GHz (54 GHz a la salida del Klystron) y 118 GHz (59 GHz a la salida del Klystron), con el oscilador Gunn se puede cubrir toda la banda entre 85 GHz y 116 GHz. Lo anterior significa que el receptor puede ser sintonizado para observar una mayor cantidad de transiciones moleculares, aumentando sus potencialidades científicas. Otra ventaja importante es la facilidad de operación del oscilador Gunn en relación al Klystron. El Klystron requiere de altos voltajes para ser operado y de una bomba de agua para ser enfriado. El oscilador Gunn sólo requiere de una polarización del orden de 10 VDC para generar potencia y un disipador de calor. Si bien también se requiere de la implementación de un *phase lock loop* esto no genera mayores complicaciones. Una revisión en un contexto general de las distintas tecnologías usadas para generar potencia en frecuencias de microrondas se puede encontrar en [8], [16].

3.4. Aspectos básicos sobre el *Phase Lock Loop*

Debido a la tendencia de los osciladores a cambiar su frecuencia de salida con la temperatura, las variaciones de la impedancia de la carga u otras causas, se requiere de algún esquema por medio del cual estabilizar la frecuencia de salida. Esta estabilización de la frecuencia de salida se logra por medio del llamado *Phase Lock Loop*, cuyas principales características se discuten a continuación.

La configuración clásica de un *Phase Lock Loop* se muestra en la figura 3.10.

El detector de fase es un dispositivo que compara dos frecuencias de entrada generando una salida que es una medida de la diferencia de fase de las señales. Si las señales no tienen frecuencias iguales, el detector de fase genera una señal de error que, luego de filtrada y amplificada, es aplicada al oscilador controlado por voltaje (VCO - *Voltage Controlled Oscillator*) de modo de desviar su frecuencia en la dirección de f_{IN} . Con un diseño apropiado se logra finalmente que f_{VCO} sea igual a f_{IN} y que mantengan una relación de fase constante.

El lograr un adecuado diseño para un PLL es un problema bastante complicado, sin embargo en el mercado existen muy buenas implementaciones que permiten disponer de bloques funcionales muy confiables y fáciles de usar. Además del control de frecuencia, el PLL

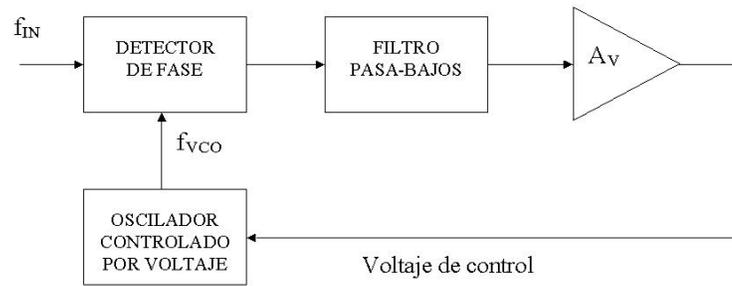


Figura 3.10: Configuración básica de un *Phase Lock Loop*.

tiene aplicaciones muy diversas como demodulación de señales FM y AM, multiplicación de frecuencia, síntesis de frecuencias, entre otras. Una presentación sobre los principios de funcionamiento, las diversas aplicaciones y muchas referencias a bibliografía específica se puede encontrar en el capítulo 9 de [12].

Capítulo 4

Instalación del oscilador Gunn

Para la implementación del oscilador Gunn en el laboratorio se requiere realizar una serie de actividades. Cada una de ellas tuvo sus propias complicaciones, algunas de tipo práctico-administrativo y otras de tipo técnico. Este capítulo describe cada una de estas etapas, con sus problemas y resultados más relevantes.

4.1. Traslado de la instrumentación y del oscilador local original

Si bien el radiotelescopio se ubica en Cerro Tololo, debido a razones prácticas y económicas, el trabajo debió ser realizado en el DAS. Para este fin se trasladó el receptor y la instrumentación que sería usada durante el trabajo, desde su ubicación original en Cerro Tololo a las dependencias del DAS en Cerro Calán, Santiago.

Para el traslado de los equipos se debió realizar dos viajes a Cerro Tololo. Cada viaje requiere de la autorización del Director del observatorio, trámite que toma algunos días y que está sujeta a la disponibilidad de habitaciones en Cerro Tololo. La obtención de esta autorización provocó una demora en la planificación original de al menos 5 semanas.

El traslado de este tipo de instrumentos es una labor que requiere de mucho cuidado. Los equipos son bastante delicados y sus interconexiones muy complejas, por lo que debe

ser realizado por personas que tengan conocimiento del instrumento. La etapa más compleja fué la bajada del receptor desde la antena (figura 4.1), la que fué realizada con la ayuda de Leonardo Bronfman y Fernando Olmos. En esta parte se requiere, además de desconectar de manera apropiada gran cantidad de equipos, bajar por medio de un tecele el receptor que se encuentra en un segundo piso. Durante estas operaciones es muy fácil dañar el equipo por lo que se debe ser muy cuidadoso.

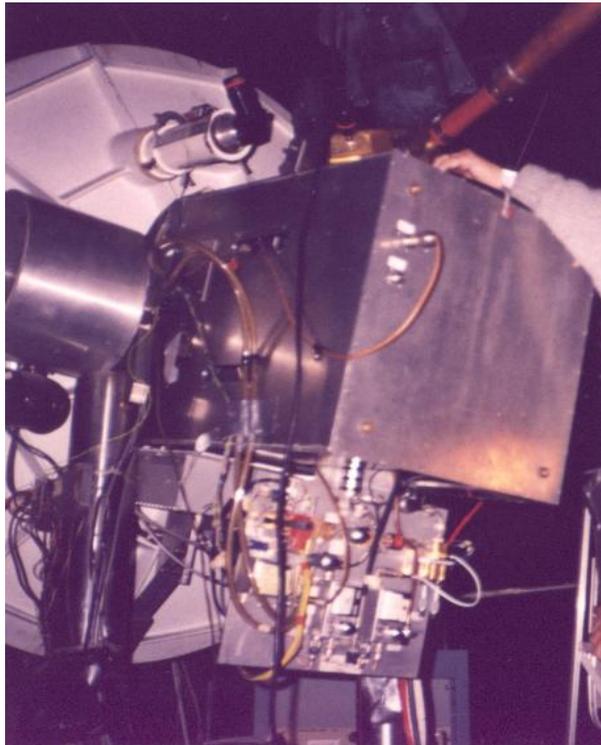


Figura 4.1: Ubicación del oscilador local en el radiotelescopio. Se ve la placa del oscilador local, el termo donde se encuentra el *front-end* enfriado a 77 K, se encuentra dentro de la caja metálica que se ve en la imagen.

Como una forma de facilitar el proceso de montaje posterior del radiotelescopio se dejó un completo registro de cada una de las operaciones realizadas, junto con fotografías de los pasos más complicados. Este registro se encuentra junto con la documentación de la operación del radiotelescopio.

Finalmente se montó en el DAS el receptor y toda la instrumentación necesaria para realización del trabajo. Una vista general del laboratorio se muestra en la figura 4.2.



Figura 4.2: Vista general del laboratorio instalado en el Departamento de Astronomía en Cerro Calán.

4.2. Diseño del nuevo oscilador local

El diagrama de bloques del oscilador local que será implementado en el receptor, se muestra en la figura 4.3. Este diseño se basa en el usado en el telescopio gemelo de éste radiotelescopio, que está ubicado en Boston y es operado por el *Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics - CfA*.

La función de cada uno de los bloques del diagrama es la siguiente: A la salida del oscilador Gunn se usa un aislador que impide que la potencia reflejada por mal acoplamiento con el diplexor de anillo resonante retorne al oscilador Gunn generando inestabilidades. Luego del aislador se usa un acoplador direccional que permite tomar una muestra de la señal generada por el Gunn. Esta señal es comparada por el PLL con una señal de referencia en-

tregada por un oscilador de cristal a 80 MHz. La señal de muestra del Gunn es combinada en un *harmonic mixer* con una señal de referencia del orden de 4 GHz que se genera a partir de un sintetizador de frecuencia y un sistema que permita subir la frecuencia al rango deseado. El diplexor permite separar la señal que se inyecta al *harmonic mixer* de la salida a 80 MHz que es comparada en el PLL con la referencia del oscilador de cristal y que permite el enclavamiento del Gunn. El PLL es una unidad comercial especialmente diseñada para trabajar con osciladores Gunn. La función de cada uno de los componentes del sistema y la definición de sus parámetros más importantes se dan en la siguiente sección.

4.3. Proceso de especificación y adquisición de los componentes

Para poder implementar este oscilador local, se debe especificar y adquirir los componentes necesarios. Este proceso debe realizarse de forma muy cuidadosa debido al alto costo y la escasa disponibilidad de dispositivos a estas frecuencias. La información necesaria para especificar estos componentes se encuentra bastante dispersa en la literatura, sitios web y catálogos de los fabricantes. Algunas referencias que ayudan en este proceso son [8], [16] y [4]. El último de ellos es una buena introducción a algunos de estos dispositivos desde el punto de vista funcional, mientras que los dos primeros son más útiles desde el punto de vista del diseño y principios de funcionamiento de éstos.

Este proceso se hace bastante difícil debido a la poca información disponible sobre las características y formas de operación de los dispositivos existentes. Otro factor que dificulta las compras es la mala recepción de algunos distribuidores. En varias ocasiones para obtener una cotización se tuvo que esperar por tiempos bastante largos y no siempre se entregaba la información requerida en forma clara. Información sobre los costos de los principales dispositivos se encuentra en el apéndice C.

Otro problema encontrado es la gran cantidad de tiempo requerido para materializar una compra. En este punto hay dos factores importantes, el primero de ellos es la gran demora en obtener los documentos en dólares necesarios para pagar a los distribuidores. Aún contándose

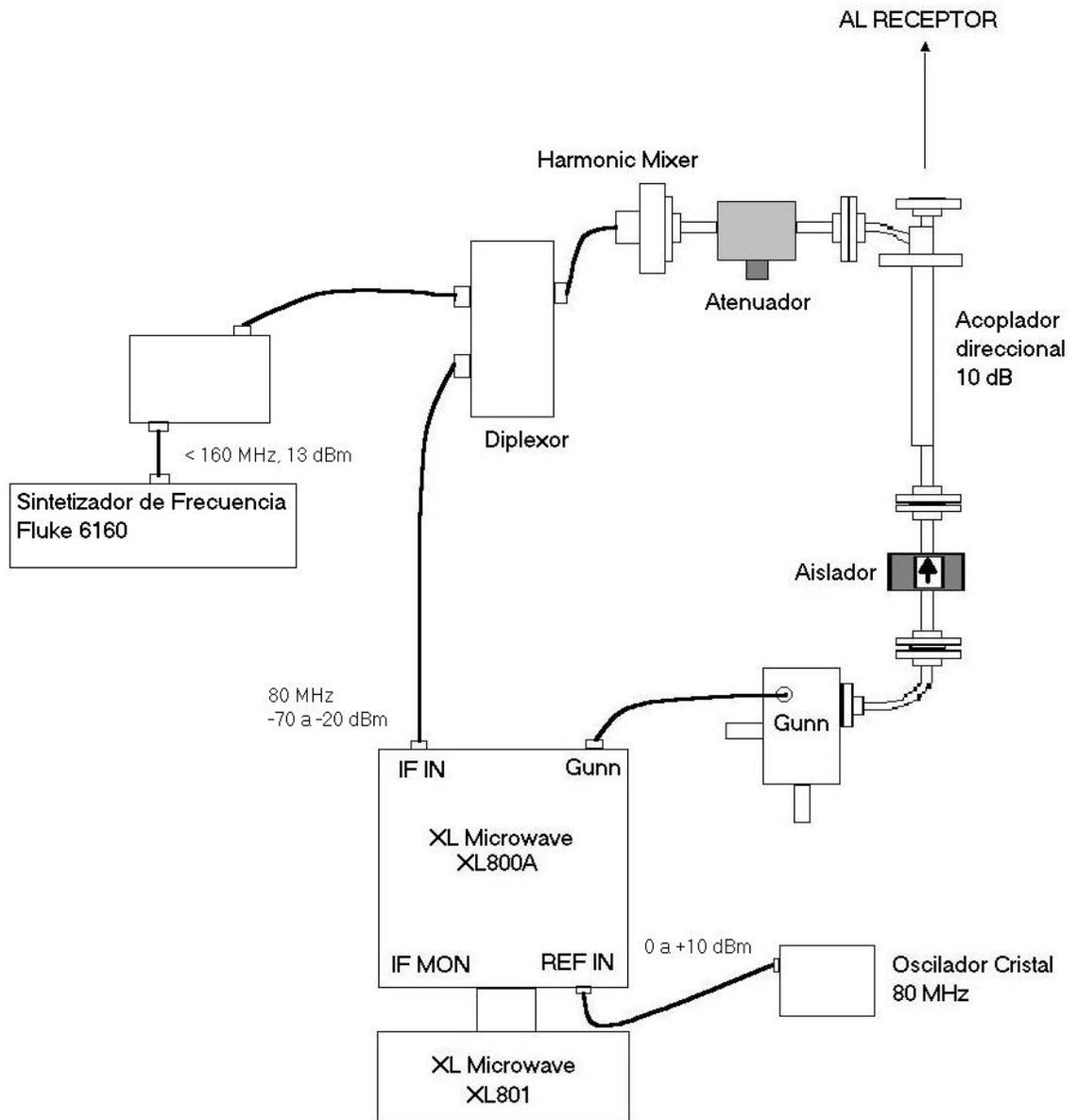


Figura 4.3: Diagrama de bloques del nuevo oscilador local.

con los fondos este trámite puede tomar cerca de un mes. El segundo factor es que no siempre los dispositivos están disponibles, por lo que se debe esperar unas cuantas semanas entre la formalización de la compra y el recibo de los productos.

4.4. Principios de funcionamiento y especificaciones de los componentes del oscilador local

Para tomar una decisión de compra se debe considerar aspectos básicos como los niveles de potencia máximos y mínimos de cada elemento, el tipo de conectores de radio frecuencias, las pérdidas que introduce el elemento y la calidad de la adaptación de impedancia que se mide por la razón de onda estacionaria (VSWR, *Voltage Standing Wave Ratio*), que tiene que ver con la cantidad de potencia que se refleja en una transición en guías de onda y que finalmente representa una pérdida de potencia.

En esta sección se describe las características y parámetros que definen el comportamiento de los dispositivos utilizados en este trabajo.

4.4.1. Oscilador Gunn

El oscilador Gunn fué fabricado por J. E. Carlstrom Co ¹ (figura 3.9). Las especificaciones de éste se dan en la tabla 4.1. La descripción del principio de funcionamiento y el detalle de este componente se da en la sección 3.2.2.

Rango de frecuencias	~ 82 GHz - ~ 117 GHz
Potencia de salida	ver figura 3.8
Voltaje de polarización	~ 10 VDC, ~ 170 mA

Tabla 4.1: Datos básicos oscilador Gunn de J. E. Carlstrom Co.

¹Esta compañía ya no fabrica estos osciladores

4.4.2. Phase Lock Loop

Para realizar el control de frecuencia del oscilador Gunn se utilizan los siguientes dispositivos fabricados y distribuidos por XL Microwave Inc.² (ver figura 4.4).

- Oscillator Phase Lock Module, Model 800A
- Control Unit, Model 801



Figura 4.4: Phase Lock Loop para oscilador Gunn de XL Microwave.

El módulo de PLL (XL800A) contiene todos los elementos necesarios para enclavar el oscilador Gunn. Para esto compara una señal de referencia dada por un oscilador de cristal (ver 4.4.5) con la salida del *harmonic mixer* (ver 4.4.3).

La unidad de control (XL801) permite ajustar el voltaje de polarización del Gunn y la ganancia del PLL. También hace posible, por medio de interruptores, controlar el encendido

²XL Microwave Inc. 5811 Racine Street, Oakland, CA 94609-1519. USA Voice: (510) 428-9488; FAX: (510) 428-9469. Sitio Web: www.xlmicrowave.com

del oscilador Gunn y del PLL. Además de lo anterior habilita una salida de monitoreo de la frecuencia intermedia que entra al XL800A, que si se desea puede ser vista en un analizador de espectros.

En el apéndice D se entrega la hoja de datos de ambos dispositivos. La descripción detallada del sistema se puede encontrar en [20].

4.4.3. *Harmonic mixer*

La función del *harmonic mixer* es mezclar la señal del oscilador Gunn (una frecuencia del orden de 100 GHz) con armónicas de una señal de oscilador local a una frecuencia bastante menor (de unos pocos GHz). De este modo se puede contar con una referencia de una frecuencia mucho más baja, lo cual hace más fácil satisfacer los requerimientos de estabilidad y precisión. El *harmonic mixer* es un dispositivo de dos terminales, uno de ellos permite la entrada de la señal del oscilador Gunn, mientras que el otro terminal permite la entrada de la señal de referencia y al mismo tiempo la salida de las combinaciones generadas en el dispositivo. Es por esta razón que se requiere separar por medio de filtros estas señales usando un diplexor (ver 4.4.4).

El *harmonic mixer* usado es el modelo WM de Pacific Millimeter Products ³ (figura 4.5). Este *harmonic mixer* permite bajar la frecuencia de la señal de salida del oscilador Gunn, por medio de la combinación de ésta con armónicas de una señal de aproximadamente 4 GHz. Esta señal debe ser controlable por medio de un sintetizador de frecuencia, esto para poder sintonizar la salida del Gunn a distintas frecuencias y permitir la observación de material a distintas velocidades y para distintas líneas de emisión. La descripción proporcionada por el fabricante se entrega en el apéndice D.

4.4.4. Diplexor

Debido a que el *harmonic mixer* es un dispositivo de dos terminales, se requiere separar la señal de referencia de la señales generadas por él, las cuales salen por el mismo terminal.

³Pacific Millimeter Products. Tel: (303) 526-7866 Fax: (303) 526-7865. Sitio Web: www.pacificmillimeter.com



Figura 4.5: *Harmonic mixer* para banda W de Pacific Millimeter Products.

Un diplexor es un dispositivo que permite separar (o unir) dos bandas de frecuencia.

Para el diplexor existen dos alternativas, la primera de ellas es comprar un *harmonic mixer* y diplexor integrados como el que vende Pacific Millimeter Products. La segunda alternativa es reutilizar el diplexor presente en la unidad de PLL del Klystron, esta alternativa ya fué usada en el radiotelescopio milimétrico del CfA y dió buenos resultados por lo que es la alternativa escogida. Este dispositivo es en realidad un triplexor, por lo que además permite la administración de polarización al *harmonic mixer* o de un retorno a tierra en caso que la polarización no sea necesaria.

4.4.5. Oscilador de referencia para el PLL

Como referencia para el PLL se puede usar algún oscilador de cristal con buenas características de ruido, estabilidad de temperatura y envejecimiento. En este caso se escogió el oscilador de cristal con compensación de temperatura (*Temperature Compensated Crystal Oscillator, TCXO*) TC-140-BGB-207A 80 MHz de Vectron International ⁴. Este oscilador tiene una estabilidad de temperatura de $\pm 2,0 \times 10^{-7}$ entre 0°C y 50°C , un envejecimien-

⁴Vectron International. Sitio Web: www.vectron.com

to menor que 2ppm/10 años, entrega una potencia de 0 dBm a 6 dBm y requiere una alimentación de 12 VDC, 20 mA. El ruido de fase típico para un oscilador similar a 10 MHz es de -110 dBc/Hz a 10 Hz de la frecuencia portadora y -135 dBc/Hz a 100 Hz de la portadora. La hoja de datos detallada de este oscilador se puede ver en el apéndice D.

Este dispositivo aún no ha sido adquirido, porque se ha tenido algunos problemas con el distribuidor. Esto no es un problema muy serio pues durante la etapa de pruebas este componente puede ser reemplazado por un sintetizador de frecuencia disponible en el laboratorio, mientras se logra su adquisición.

4.4.6. Oscilador local para *harmonic mixer*

Para especificar este bloque se debe conocer el comportamiento del *harmonic mixer*. En el sistema implementado en el CfA se usa una *Phase-Locked Source* que genera frecuencias cercanas a 4.8 GHz, la cual puede ser controlada por medio de un sintetizador de frecuencia. Este bloque debe ser seleccionado dentro de los que actualmente están en el mercado, trabajo que aún está pendiente pues no se cuenta con información sobre los niveles de potencia requeridos a la salida de este bloque y tampoco se puede hacer las pruebas necesarias para determinarlo con los instrumentos disponibles en el laboratorio.

Una de las principales restricciones para este bloque es que se tomó la decisión de conservar el actual sintetizador de frecuencia (Fluke 6160) debido a sus excelentes características de ruido, estabilidad y resolución en frecuencia. El cambiar este sintetizador implicaría realizar complejas modificaciones en el software de control, complicación que por el momento se quiere evitar.

Sistema de prueba: Mientras no se determine este bloque, se generará la señal del oscilador local para el *harmonic mixer* por medio del equipo disponible en el laboratorio. Para este efecto se utiliza parte del sistema de PLL del Klystron, con el que se puede generar frecuencias cercanas a 4 GHz, con niveles de potencia de hasta 12 dBm.

La señal de 4 GHz se obtiene a partir de una referencia que entrega un sintetizador de frecuencia Fluke 6160. Esta señal es primero mezclada en un mixer con una a 570 MHz y el resultado es multiplicado por 6. El detalle de esta etapa se puede ver en [14].

4.4.7. Atenuadores

Principio de funcionamiento: Los atenuadores permiten regular el nivel de potencia de modo de proteger algunos elementos y ajustar mejor la respuesta de ciertas secciones (entregando los niveles de potencia óptimos). Estos también contribuyen a disminuir el efecto del mal acoplamiento entre dispositivos.

Los atenuadores pueden ser fijos o variables y existen muchas formas de construirlos, algunas de estas formas son discutidas en [8]. Uno de los mejores atenuadores que existen es el atenuador giratorio (*rotary attenuator*), que se muestra en la figura 4.6. Conceptualmente el funcionamiento es el siguiente: la onda entra al atenuador con el campo eléctrico perpendicular a la tarjeta resistiva (*resistive card*) por lo que se produce poca atenuación. Al pasar a la guía cilíndrica la onda sufre una atenuación determinada por la componente del campo eléctrico alineada con la tarjeta resistiva rotatoria. Como el campo que emerge de la guía circular no es completamente perpendicular a la tarjeta resistiva, se produce una segunda atenuación a la salida. Es fácil probar (ver [8]) que la atenuación está dada por $\alpha = -40 \log(\sin \theta) dB$. Lo más importante de todo es que este valor sólo depende del ángulo de rotación de la guía circular con respecto a la guía rectangular.

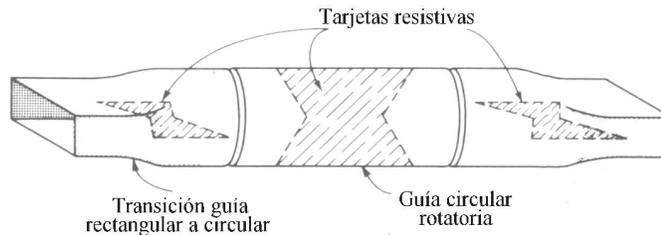


Figura 4.6: Atenuador giratorio.

El parámetro más importante de un atenuador es la *atenuación*, que corresponde a la razón entre la potencia de entrada y la de salida del atenuador en decibeles.

Especificación: En el sistema se requiere de dos atenuadores variables, uno de ellos está disponible en el antiguo oscilador local, mientras que para el otro se escogió el modelo

10-2220 de Aerowave Inc ⁵. Este atenuador (figura 4.7) provee una atenuación de hasta 30 dB, VSWR típico de 1.1:1 y soporta una potencia máxima de 200 mW para onda continua.



Figura 4.7: Atenuador para banda W de Aerowave Inc.

4.4.8. Aislador

Principio de funcionamiento: El aislador es un dispositivo de dos terminales que permite la transmisión con muy poca atenuación en una dirección, y con un gran nivel de atenuación en la otra. Este dispositivo se usa generalmente para acoplar una fuente de microondas a la carga, pues debido a sus propiedades permite que la fuente siempre vea una carga adaptada, disminuyendo las variaciones en la potencia de salida y frecuencia que podrían producirse.

El funcionamiento de este dispositivo se basa en un fenómeno denominado rotación de Faraday que corresponde a la rotación del plano de polarización de una onda electromagnética linealmente polarizada cuando esta atraviesa ferritas en presencia de un campo magnético constante. Esta rotación es producto de las distintas constantes de propagación para las ondas circularmente polarizadas derecha e izquierda.

⁵Aerowave Inc. no exporta sus productos directamente, si no por medio de distribuidores autorizados. El distribuidor usado fue Radar Systems Technologies, 480 San Antonio Road Suite 250, Mountain View, CA, USA. 94040. Sitio Web: www.rst-inc.com. El *harmonic mixer* de PMP también fue adquirido usando este distribuidor.

Un esquema de un aislador y de la forma en que éste opera se muestra en la figura 4.8. En una dirección se produce un giro en 45° el cual es compensado por la rotación Faraday en las ferritas. La onda que sale del aislador lo hace con su dirección de polarización perpendicular a la tarjeta resistiva sufriendo muy poca atenuación. Para la otra dirección se produce una rotación en 45° en las ferritas y una segunda rotación en ésta cantidad, de este modo se logra que la dirección de polarización quede paralela a la tarjeta resistiva produciéndose una atenuación casi total de la onda incidente. Los detalles del aislador y la propagación de ondas electromagnéticas en ferritas se pueden ver en [8].

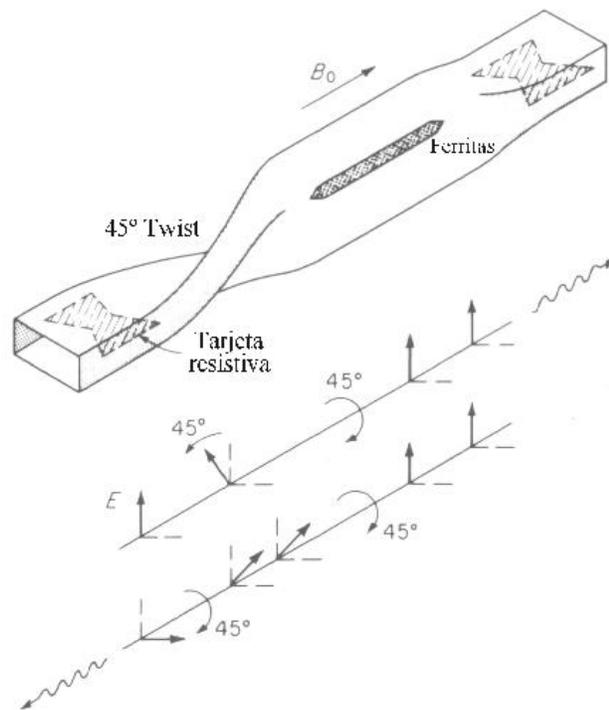


Figura 4.8: Funcionamiento del aislador [8]. Una onda que entra por la izquierda y sale por la derecha lo hace con muy poca atenuación. En el sentido inverso la atenuación es casi total.

Especificación: En el caso de este sistema la mayor desadaptación de impedancia podría darse en el diplexor de anillo resonante, por lo que el aislador es necesario para impedir que

esto genere un mal funcionamiento del oscilador Gunn.

Para este bloque se seleccionó el modelo 10-5000 de Aerowave Inc. Este aislador (figura 4.9) opera sobre toda la banda de la guía de onda WR-10, provee una aislación mayor a 25 dB, VSWR típico de 1.5:1.0 y pérdidas máximas de 2.5 dB.



Figura 4.9: Aislador para banda W de Aerowave Inc.

4.4.9. Acoplador direccional

Introducción: Un acoplador direccional es un dispositivo de cuatro puertos (puertos 1,2,3 y 4) que idealmente están perfectamente acoplados a la red (no hay reflexiones) y tiene las siguientes propiedades:

- La potencia incidente en el puerto 1, se transfiere a los puertos 2 y 3. No hay transferencia de potencia al puerto 4.
- La potencia incidente en el puerto 4, se transfiere a los puertos 2 y 3. No hay transferencia de potencia al puerto 1.
- Lo de los puntos anteriores se repite para los puertos 2 y 3, en relación a los puertos 1 y 4.

De lo anterior se tiene que los pares de puertos 1-4 y 2-3, deberían estar completamente desacoplados.

En las aplicaciones el puerto 4 se termina con una carga adaptada, por lo que se trata de un dispositivo con tres puertos. Si se hace incidir potencia por el puerto 1, ésta debería transferirse a los puertos 2 y 3. De haber transferencia al puerto 4 ésta debería ser absorbida por la terminación.

Los acopladores direccionales que usan guías de onda usualmente se construyen con dos secciones de guía de onda paralelas (figura 4.10). En la pared común a ambas se construyen aberturas de acoplamiento que permiten la transferencia de potencia. La teoría que permite entender y diseñar estos acopladores direccionales es revisada en [8].

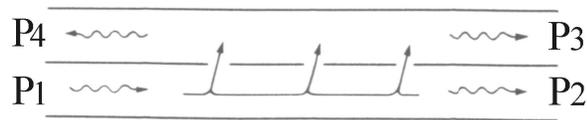


Figura 4.10: Esquema de funcionamiento del acoplador direccional.

Para especificar el comportamiento de un acoplador direccional se definen los siguientes parámetros: **Acoplamiento**, que se define como $C = 10 \log \left(\frac{P_1}{P_3} \right) dB$; **Directividad**, que se define como $D = 10 \log \left(\frac{P_3}{P_4} \right) dB$. El acoplamiento determina que cantidad de potencia que entra por el puerto 1 es acoplada en el puerto 3 (ej. $C = 10 dB$ significa que se transfiere el 10 % de la potencia al puerto 3) y la directividad la cantidad de potencia que se acopla en el puerto 4 (en relación al puerto 3) y que representa una pérdida.

Especificación: El acoplador direccional permite tomar una muestra de la frecuencia generada por el Gunn, esta muestra de frecuencia hace posible que la unidad de PLL controle la frecuencia de salida del Gunn.

Para este fin se escogió el modelo 10-3000/10 de Aerowave Inc. Este dispositivo (figura 4.11) tiene una directividad mayor que 30 dB y un acoplamiento de 10 dB, sobre toda la banda de la guía de onda WR-10.



Figura 4.11: Acoplador direccional para banda W de Aerowave Inc.

4.4.10. Conectores y guías de onda

Para proveer blindaje con respecto a señales externas, se usa cables coaxiales para la propagación de señales en equipos de radiofrecuencias. Las conexiones por medio de cables coaxiales tienen dos limitaciones, el aumento de las pérdidas en los conductores al aumentar la frecuencia y la excitación de modos de guía de onda cilíndrica. Este comportamiento está determinado tanto por el tipo de cable como por los conectores usados, siendo estos últimos el factor más importante en la determinación del comportamiento a alta frecuencia de un sistema conector-cable.

Existe una gran cantidad de conectores para radiofrecuencias, su diseño depende de su finalidad, número de conexiones-desconexiones y rango de frecuencias [9], [6]. Los conectores usados en este trabajo y su frecuencia máxima son (figura 4.12) : BNC, 2 GHz; N, 18 GHz; SMA, 12.4 GHz. Todos ellos tienen una impedancia de 50Ω .

Al ir aumentando aún más la frecuencia las pérdidas y la excitación de modos de guía



Figura 4.12: Conectores de radiofrecuencia usados. De izquierda a derecha, BNC, N y SMA.

de onda hacen imposible realizar la transmisión por medio de cables coaxiales y se debe usar guías de onda. Las guías de onda encontradas en este trabajo reciben las denominaciones estándar: WR-15 para la banda V, 50-75 GHz y WR-10 para la banda W, 75-110 GHz.

4.5. Pruebas de laboratorio

Durante el desarrollo de este trabajo se realizó una serie de pruebas necesarias para comprender el funcionamiento del sistema e implementar el oscilador. En esta sección se presenta una descripción de las más importantes.

4.5.1. Pruebas del receptor usando el oscilador Klystron

Para verificar que el receptor estaba funcionando correctamente después de ser desmontado desde el telescopio en Cerro Tololo y trasladado al laboratorio en Cerro Calán, y para adquirir un buen entendimiento del funcionamiento del sistema y de las pruebas que se pueden realizar para verificar su correcta operación, se trabajó en el laboratorio con el receptor usando el oscilador Klystron. Se hizo funcionar el receptor a temperatura ambiente, y se reprodujo en términos gruesos algunos de los procedimientos que permiten determinar los valores óptimos de los voltajes de polarización del mixer y el doblador de frecuencia, del ajuste del diplexor de anillo resonante y del ajuste del mixer *backshort*. La disposición de los equipos en el laboratorio se puede ver en las figuras 4.2 y 4.13.

Es muy importante aprender como se realizan estos ajustes, pues una vez que se instale el nuevo oscilador local en el receptor se debe repetir estos procedimientos para dejar operativo

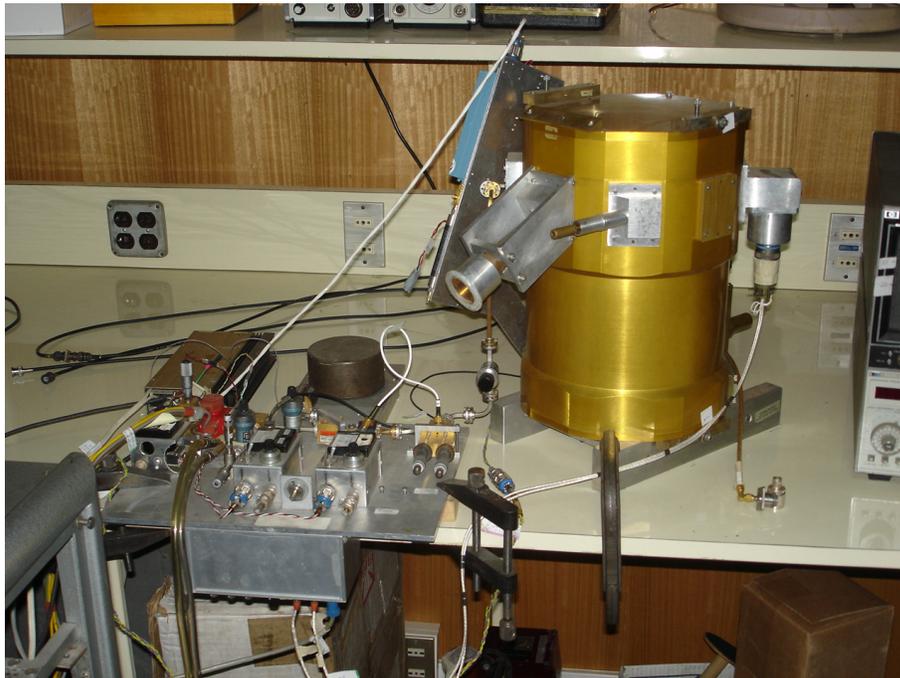


Figura 4.13: Antiguo oscilador local en el laboratorio.

y en óptimas condiciones el radiotelescopio.

El diagrama de conexiones y la descripción de los procedimientos desarrollados en esta prueba se entregan en el apéndice A.

4.5.2. Pruebas del nuevo oscilador local

Se realizó pruebas de la operación del oscilador Gunn y el PLL. Se cuenta con un completo conocimiento de la forma de operar las distintas partes del sistema. Este trabajo se resume en un diagrama de conexiones y una guía de procedimientos de operación que se presentan en el apéndice B. La figura 4.14 muestra la disposición de los equipos en el laboratorio.

El funcionamiento del PLL en el laboratorio es fácil de verificar pues la unidad de control entrega una señal cada vez que se enclava el oscilador Gunn. Para el caso de la operación

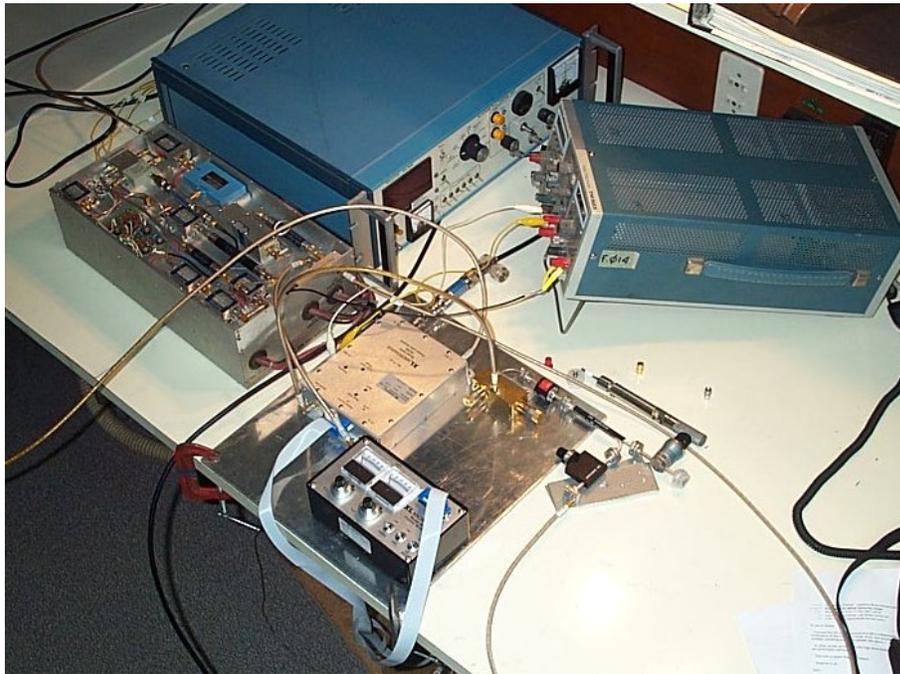


Figura 4.14: Oscilador Gunn y PLL en el laboratorio.

del receptor se debe seguir el mismo procedimiento de sintonización de la polarización del mixer, el diplexor de anillo resonante y el mixer *backshort* descritos en el apéndice A, sobre la operación del receptor con el oscilador Klystron.

Capítulo 5

Resultados y comentarios finales

Como resultado de este trabajo se logró una serie de objetivos de distinta naturaleza. El primer grupo de ellos está relacionado con la comprensión de los conceptos y tecnologías básicas sobre radioastronomía y radiotelescopios. Producto de este trabajo y del estudio de la documentación existente sobre el radiotelescopio se dió una completa descripción del sistema. Se estudió y describió en detalle las tecnologías de oscilador local usadas en el radiotelescopio. Lo anterior, junto con hacer posible y coherente el resto del trabajo, será una muy útil referencia para futuros desarrollos relacionados con este instrumento.

Un segundo grupo de objetivos de orden más práctico y que se menciona a continuación: se trasladó el receptor y todos los equipos necesarios para su operación desde Cerro Tololo a Cerro Calán; se adaptó, especificó y adquirió gran parte de los dispositivos que componen el nuevo oscilador local del radiotelescopio; se logró operar exitosamente el receptor con el oscilador local original y se operó el oscilador Gunn con su PLL. Como una ayuda a futuros desarrollos se confeccionó diagramas de conexión y guías de procedimientos para cada una de estas experiencias.

Durante el desarrollo de este trabajo se tuvo una serie de inconvenientes de diversa índole, los cuales se reseñan a continuación, con el fin de ser considerados en la planificación y realización de futuros trabajos relacionados. La demora en la obtención de la autorización del

Director del observatorio para retirar el receptor y los instrumentos desde Cerro Tololo, lo que ocasionó un retraso de al menos cinco semanas al calendario original. La poca información sobre los productos que los fabricantes de dispositivos para estas aplicaciones entregan, hace que sea bastante difícil encontrar lo que se busca, sobre todo cuando no se tiene mucha experiencia. Debido a que el pago a los distribuidores debe realizarse usando documentos en dólares, debe considerarse que este trámite toma cerca de un mes, aún si se cuenta con los fondos para efectuar la compra. Sumado a todo lo anterior está el hecho que la sola materialización de la compra misma puede tomar cerca de un mes pues generalmente los dispositivos no están disponibles en forma inmediata en el distribuidor.

Además de los resultados directamente relacionados a la ejecución del trabajo, su desarrollo constituyó una muy completa y provechosa experiencia profesional, que implicó la solución de una gran variedad de problemas de toda índole. Es de esperar que este documento, que reúne algunas de esas experiencias, sea de utilidad para futuros trabajos relacionados con el radiotelescopio y la radioastronomía.

Bibliografía

- [1] ALLISON, J. 1990. Electronic Engineering Semiconductors and Devices. Second edition. McGraw-Hill Book Company. 376p.
- [2] BRONFMAN, L., et al. 1988, Astrophysical Journal 324, 248.
- [3] BRONFMAN, L., et al. 1989, Astrophysical Journal Supplement Series 71, 481.
- [4] CHANG, K. 2000. RF and Microwave Wireless Systems. John Wiley & Sons. 339p.
- [5] CHRISTIANSEN y W.N. HOGBOM, J.A. 1985. Radio Telescopes. Second edition. Cambridge University Press. 265p.
- [6] COAXIAL CONECTORS, WAVEGUIDES BANDS. [En línea] <<http://www.walmba.org>>. [Consulta: Octubre 2004]
- [7] COHEN, R. 1983. Columbia University Southern Millimeter-Wave Survey Telescope. En: BURTON, W. B. y ISRAEL, F. P. (Eds). Surveys of the Southern Galaxy. D. Reidel Publishing Company. pp. 265-269.
- [8] COLLIN, ROBERT E. 1992. Foundations for microwave engineering. Second edition. McGraw-Hill, Inc. 924p.
- [9] COMMON COAXIAL CONECTORS. [En línea] <<http://www.ece-colorado.edu/kuester/Coax/connchart.htm>>. [Consulta: Octubre 2004]

- [10] CONG, HONG-IH, et al. 1979. The Low-Noise 115-GHz Receiver on the Columbia-GISS 4-ft Radio Telescope. Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 27, N^o 3. IEEE. pp. 245-248.
- [11] DAHMEN, G. 1995. The Large Scale Distribution of Molecular Gas in the Galactic Center Region from $C^{18}O$ and the Nitrogen Isotope Abundance in the Galaxy. Ph. D. Thesis. Universität Bonn, Alemania. 191p.
- [12] HOROWITZ, P. y HILL, W. 1989. The Art of Electronics. Second edition. Cambridge University Press. 1125p.
- [13] KRAUS, JOHN D. 1966. Radio Astronomy. McGraw-Hill, Inc. 481p.
- [14] PALMER, E. S. 1982. A frequency-agile phase lock system for stabilizing millimeter wave klystrons. NASA Goddard Institute for Space Studies, Goddard Space Flight Center, internal report. 60p.
- [15] PHILLIPS, T.G. 1994, Millimeter and Submillimeterwave Receivers. En: ISHIGURO, M. y WELCH, WM. J. (Eds). Astronomy with Millimeter and Submillimeterwave Interferometry. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Volume 59. pp. 68-77.
- [16] POZAR, D. M. 1997. Microwave Engineering. Second edition. John Wiley & Sons. 736p.
- [17] RIEKE, GEORGE 2003. Detection of Light, from the ultraviolet to the submillimeter. Second edition. Cambridge University Press. 363p.
- [18] ROHLFS, K. y WILSON, T.L. 1996. Tools of Radio Astronomy. Third edition. Berlin : Springer. 441p.
- [19] STANIMIROVIC, S., et al. (Eds.) 2002. Single-Dish Astronomy: Techniques and Applications. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Volume 278. 536p.
- [20] XL MICROWAVE INC. 2002. Operation and Maintenance manual. 24p.

Apéndice A

Operación del oscilador Klystron en el laboratorio

En este apéndice se describe el procedimiento de operación del oscilador local original. El objetivo es contar con una referencia y reunir la información sobre su operación que está dispersa en la documentación del radiotelescopio. Si bien este oscilador local será reemplazado, este sistema sirve para realizar pruebas y fué muy útil como introducción a la operación del receptor. Se incluyen una guía de procedimientos para su operación y el diagrama de conexión de los equipos utilizados.

1. Conexiones según diagrama.
2. Procedimiento de partida.
 - a)* Partir bomba de agua.
 - b)* Verificar potencia RF apagada. Máxima atenuación en atenuadores a la salida del Klystron (Ambos) y a la entrada del termo (Girar en sentido horario).
 - c)* Verificar voltaje del doblador de frecuencia apagado (Girar en sentido antihorario).
 - d)* Verificar voltaje de mixer apagado (Girar en sentido antihorario).

- e) Quitar los cortos del mixer, doblador y harmonic mixer.
 - f) Dar potencia a la placa de oscilador local.
 - g) Verificar que circula agua en el Klystron.
 - h) Encender simultáneamente.
 - 1) PLL power supply box.
 - 2) Reflector voltage on, 288 V.
 - i) Esperar un minuto y Beam voltage on, 1671 V.
 - 1) Se debe tener corriente de beam del orden de 10 mA. En este caso se tiene 11 mA.
 - 2) El voltaje de beam se debe aplicar en pasos de 500 V para evitar la formación de arcos.
 - j) Dar potencia de RF, atenuadores del Klystron y termo.
 - k) Polarización del mixer, -0.76 V. Con esto se obtiene una corriente de polarización de 0.5 mA. Este valor debe estar en el rango de -0.8 a 0 V.
 - l) Polarización del doblador de frecuencia, 2.0 V. Este valor se ajusta para maximizar la corriente DC en el mixer.
 - m) Ajustar tornillos micrométricos del doblador. M1: 0.5 + 2.5 y M2: 2.5 + 17. Este ajuste maximiza la corriente DC en el mixer.
 - n) Ajustar el diplexor de anillo resonante para maximizar la corriente DC del mixer. La corriente del mixer es muy sensible a este ajuste.
 - ñ) Ajustar mixer backshort para maximizar corriente DC del mixer. La corriente del mixer no es muy sensible a este ajuste, sin embargo este ajuste es importante cuando se quiere minimizar la temperatura de ruido. No es recomendable realizar este ajuste muy seguido pues acorta la vida útil del mixer.
3. Para apagar el receptor.
- a) Cortar RF a termo.

- b)* Cortar RF a salida del Klystron.
- c)* Polarización del mixer y doblador a 0.0 V.
- d)* Beam voltaje a 0.0 V.
- e)* Beam H.V. off
- f)* Reflector voltaje a 0.0 V.
- g)* Beam off.
- h)* Simultáneamente: PLL power supply off y Reflector off.
- i)* Desconectar potencia L.O. Plate.
- j)* Poner cortos en mixer, doblador y harmonic mixer.
- k)* Desconectar bomba de agua.

Apéndice B

Operación del oscilador Gunn en el laboratorio

Con el fin de reunir en un solo documento la información necesaria para operar el nuevo oscilador local, se presenta una guía de procedimientos y el diagrama de conexiones para el nuevo sistema.

1. Conexiones según diagrama (figura B.1). Si se desea operar el receptor, además de las conexiones del diagrama, se debe conectar la *mixer bias box* y la *GASFET Amplifier Power Supply*, ubicadas en la placa del oscilador Klystron. Al hacer esto se debe desconectar la energía del *doubler bias box*.
2. Antes de la partida.
 - a) Ajustar frecuencia Gunn, ajustando micrómetros según hoja de datos H315. Esto corresponde a un ajuste grueso, el ajuste se afina más adelante para lograr *lock*.
 - b) Atenuadores RF y PLL al máximo de atenuación.
 - c) PTS Frequency Synthesizer, 80 MHz, 0 a 10 dBm.
 - d) En XL801

$$V_{OP} = 10 \text{ VDC.}$$

V_{LG} al mínimo.

IF MON, SWEEP y OSC. OFF

- e) Seleccionar frecuencia del *Fluke Frequency Synthesizer*, salida de potencia al mínimo. No más de 15 dBm de señal de oscilador local al harmonic mixer. La frecuencia de oscilador local al harmonic mixer y la salida del Fluke están relacionadas por

$$f_{LO} = 6 \times (f_{Fluke} + 507MHz)$$

Para una determinada frecuencia de salida del Gunn (f_{Gunn}), se tiene

$$f_{Gunn} - 6N(f_{Fluke} + 507MHz) = 80MHz$$

Donde N, es la armónica de la señal del oscilador local que es mezclada con la señal del Gunn en el harmonic mixer. Para una determinada frecuencia de salida del Gunn se requiere el siguiente valor de la frecuencia del Fluke.

$$f_{Fluke} = \frac{f_{Gunn} - 80}{6N} - 507$$

Donde todos los valores están en MHz. Dependiendo de la armónica considerada se obtiene diferentes valores para la frecuencia del Fluke, es conveniente escoger el valor que haga uso de la menor armónica de la señal, para disminuir las pérdidas de conversión del *harmonic mixer*.

3. Procedimiento de partida

Al realizar las primeras dos operaciones se debe estar conectado a tierra usando una pulsera antiestática. Lo mismo se debe hacer al momento del apagado del sistema.

- a) Quitar corto circuito mixer bias box.
- b) Quitar corto circuito harmonic mixer, conectar al triplexer.
- c) Encender fuente de poder para PLL.

- d) Encender sintetizadores de frecuencia, Fluke y PTS.
- e) Encender oscilador, Interruptor OSC ON, en XL801
- f) Reducir atenuación en atenuador PLL. Esto es para limitar la potencia del Gunn al harmonic mixer. Se debe tener $P_{RF} + P_{LO} < 100 \text{ mW}$ y $P_{LO} < 31,63 \text{ mW}$ (15 dBm), luego se debe tener al menos $P_{RF} < 68,38 \text{ mW}$. Como el Gunn entrega a lo más 60 mW, usando un acoplador de 10 dB, se tiene a lo más 6 mW, por lo que el límite de potencia de RF no es un problema.
- g) Encender oscillator sweep, SWEEP ON.
- h) Dejar V_{LG} en algún valor intermedio. Ajustar cuidadosamente el *Tuning micrometer* del Gunn hasta lograr *lock*. También podría ser necesario ajustar V_{LG} , esto modifica la respuesta transiente.
- i) Reducir atenuación en atenuador de RF. Recien en este punto comienza la operación del receptor, lo anterior era solo para operar el Gunn y el PLL.
- j) Maximizar corriente DC del mixer ajustando el mixer backshort y el diplexor de anillo resonante.

4. Apagar receptor

- a) Apagar oscilador Gunn, OSC OFF.
- b) Apagar Fluke y PTS.
- c) Apagar fuente de poder.
- d) Poner corto circuito al mixer.
- e) Desconectar harmonic mixer - triplexer y poner corto circuito.

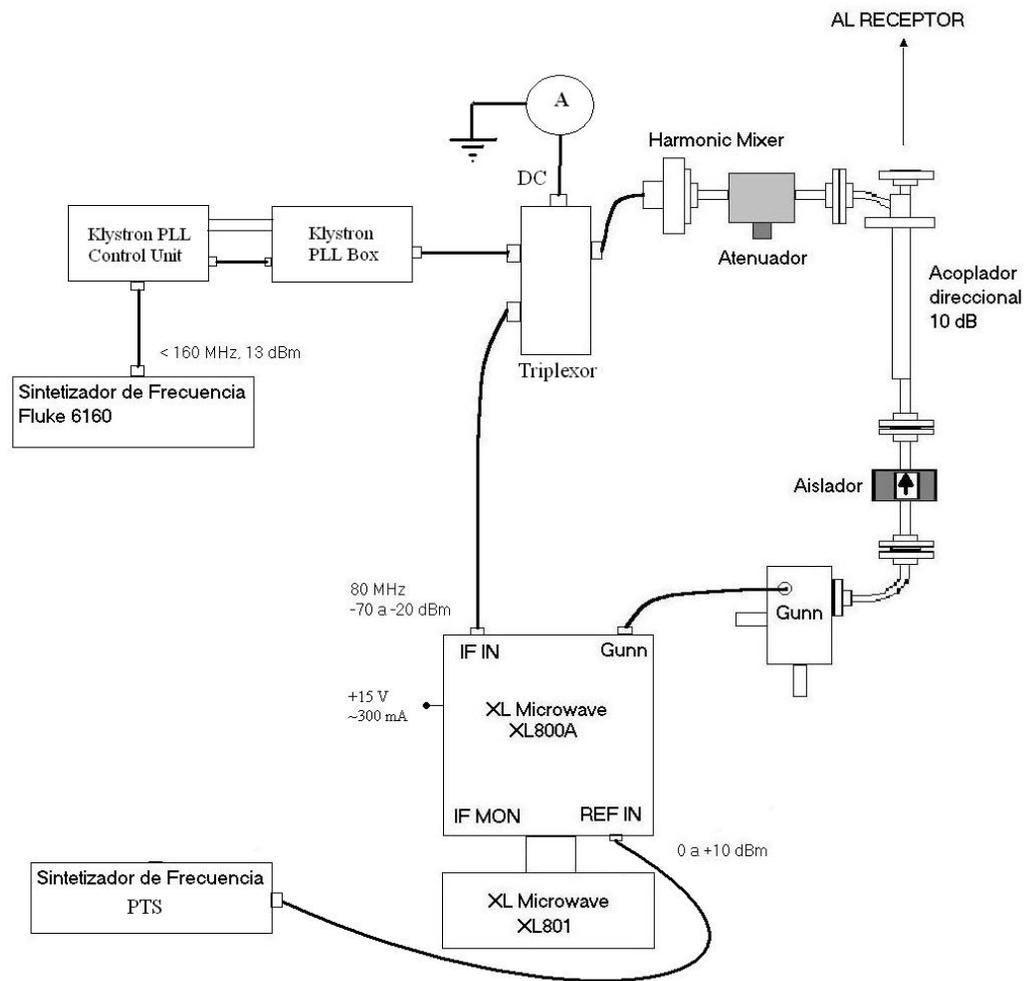


Figura B.1: Diagrama de conexiones para prueba de oscilador Gunn en el laboratorio.

Apéndice C

Costo de los dispositivos adquiridos

Como referencia se entregan los costos de los principales dispositivos. Estos costos no incluyen impuestos ni gastos de envío.

Dispositivo	Costo US \$
Oscilador Gunn, J. E. Carlstrom Co.	10.000
Modelos 800A y 801, XL Microwave	2.320
Isolator 10-5000 75-110 GHz, Aerowave	1.625
Attenuator 10-2220 75-110 GHz, Aerowave	940
Dir. Coupler 10-3000/10 75-110 GHz, Aerowave	1.190
WM Harmonic Mixer 75-110 GHz, PMP	720

Tabla C.1: Costos de los dispositivos adquiridos.

Apéndice D

Documentación adicional

En este apéndice se incluye la siguiente información adicional:

- Hoja de datos oscilador Gunn, J. E. Carlstrom Co.
- Hoja de datos XL800 y XL801A, XL Microwave Inc.
- Hoja de datos *harmonic mixer* WM, Pacific Millimeter Products.
- Hoja de datos oscilador de cristal con compensación de temperatura TC-140, Vectron International.