

Doctorado en Ingeniería, Mención
Procesamiento de Imágenes y Señales

Diseño, Construcción y Análisis de Datos de un Lidar Raman Multiángulo

Ing. Juan Vicente Pallotta

Director: Dr. Eduardo Jaime Quel

Co-directores: Dra. Lidia Ana Otero, Dr. Alberto Etchegoyen



Índice general

1. Introducción	15
1.1. Sistema lidar. Características generales	17
1.1.1. Ecuaciones del sistema lidar elástico	17
1.1.2. Ecuaciones del sistema lidar Raman	21
1.2. Observatorio Pierre Auger (OPA) – Observatorio Cherenkov Telescope Array (CTA)	22
1.2.1. Observatorio Pierre Auger	23
1.2.2. Observatorio Cherenkov Telescope Array (CTA)	25
1.3. Necesidades del estudio atmosférico en Observatorios	26
1.4. Especificaciones generales del Lidar a desarrollar en este trabajo	29
1.5. Conclusiones	30
2. Aerosoles atmosféricos y su caracterización óptica	31
2.1. Introducción	32
2.2. Atmósfera terrestre	32
2.2.1. Capas de la atmósfera terrestre	32
2.2.2. Composición de la atmósfera terrestre	33
2.3. Aerosoles atmosféricos	34
2.3.1. Redes de medición de los aerosoles	35
2.3.2. Clasificación de los aerosoles	36
2.3.2.1. Ley de Ångström	36
2.3.2.2. Distribución de tamaños	38
2.3.2.3. Clasificación en base al coeficiente de Ångström y el espesor óptico	39
2.4. Propiedades ópticas de la atmósfera y sus efectos en la propagación de la radiación	41
2.4.1. Absorción	43
2.4.2. Dispersión elástica	43
2.4.2.1. Dispersión Rayleigh	46
2.4.2.2. Dispersión Mie	48
2.4.3. Dispersión Raman	50
2.5. Conclusiones	51
3. Diseño Conceptual del Lidar Raman Multiángulo	53
3.1. Introducción	54
3.2. Especificaciones generales del lidar multiángulo	54
3.3. Especificaciones de la óptica de recepción, láser y electrónica de adquisición. Criterios de selección	54

3.3.1.	Óptica de recepción	54
3.3.1.1.	Telescopios	55
3.3.1.2.	Caja espectrométrica	56
3.3.2.	Láser	57
3.3.3.	Electrónica de adquisición. Resolución espacial y tiempo de promediación	58
3.4.	Simulaciones del lidar multiángulo	59
3.4.1.	Modelo de hardware utilizado	59
3.4.2.	Modelo atmosférico utilizado en la simulación	59
3.4.2.1.	Modelo de distribución vertical de moléculas y aerosoles	59
3.4.3.	Simulación de la relación señal/ruido (S/N)	60
3.4.4.	Alcance de los parámetros obtenidos con las simulaciones	64
3.5.	Conclusiones	65
4.	Construcción del lidar Raman multiángulo. Mecánica y electrónica	67
4.1.	Introducción	68
4.2.	Mecánica	68
4.2.1.	Sistema de escaneo cenital/acimutal del láser-telescopios	69
4.2.2.	Telescopios. Sujeción del espejo, soporte y sistema de alineación	72
4.2.2.1.	Sujeción del espejo. Prototipos realizados	73
4.2.2.2.	Sistema de alineación de los telescopios	75
4.2.2.3.	Factor de <i>overlap</i> resultante	77
4.2.3.	Contenedor-domo	79
4.3.	Electrónica	81
4.3.1.	Comunicaciones	83
4.3.2.	Electrónica de adquisición	84
4.3.3.	Electrónica de control	87
4.3.3.1.	Microcontrolador	87
4.3.3.2.	Interfaces de control del microcontrolador	90
4.3.3.3.	Interfaz de control para señales de entrada. Lectura de sensores	92
4.3.3.4.	Interfaz de control para señales de salida. Control de relés	93
4.3.3.5.	Interface de control de los motores paso-a-paso	96
4.4.	Conclusiones	98
5.	Software de control, automatización y adquisición	101
5.1.	Introducción	102
5.2.	Organización del <i>software/firmware</i> del sistema	102
5.3.	Tareas del microcontrolador	106
5.3.1.	Descripción del Firmware	106
5.3.1.1.	Variables de estado	109
5.3.1.2.	Formato de los comandos TCP/IP	113
5.3.2.	Descripción del <i>web-server</i> : control manual y automático del <i>hardware</i> del lidar	114
5.4.	Procesos de la PC del operador: adquisición, visualización de señales y control del lidar multiángulo	117
5.4.1.	Proceso <i>adq</i>	120
5.4.1.1.	Proceso HIJO	121
5.4.1.2.	Proceso PADRE	122

5.4.2.	Proceso <i>lidarTask</i>	123
5.4.2.1.	Etapa 1. Inicialización del proceso: configuración de variables y conexiones	125
5.4.2.2.	Etapa 2. Configuración de variables de control: comandoStr y laserComStr	126
5.4.2.3.	Etapa 3. Ejecución de comandos	128
5.4.2.4.	Protocolo de escaneo	129
5.4.2.5.	Inicialización/finalización automática del lidar	132
5.4.3.	Proceso <i>plot</i>	134
5.4.3.1.	Proceso <i>padre</i>	136
5.4.3.2.	Proceso <i>hijo</i>	137
5.5.	Operación del lidar	137
5.5.1.	Inicio de adquisición	137
5.5.2.	Fin de adquisición	140
5.5.3.	Seguridad	140
5.6.	Conclusiones	141
6.	Sistema de auto-alineación lidar de múltiples telescopios	143
6.1.	Introducción	144
6.2.	Sistema de auto-alineación. <i>Hardware y software</i> desarrollado	144
6.3.	Procedimiento de auto-alineación. Operación cooperativa entre los diferentes procesos	145
6.3.1.	Secuencia de barrido de cada telescopio en el proceso de auto-alineación	147
6.4.	Análisis del <i>overlap</i> del sistema en función de la señal adquirida	149
6.4.1.	Factor <i>overlap</i> óptimo en función del ángulo láser-telescopio	149
6.4.1.1.	Promedio de la señal en rango lejano	150
6.4.1.2.	Factor de <i>overlap</i> óptimo y su corrección para mayor rango de detección	150
6.4.1.3.	Análisis de la posición del pico de la señal lidar	154
6.4.2.	Auto-alineación aplicada a un sistema de múltiples telescopios. Ob- tención de parámetros para la auto-alineación	157
6.5.	Conclusiones	161
7.	Reconocimiento automático de zonas moleculares y filtrado de las seña- les detectadas	163
7.1.	Introducción	164
7.2.	Detección automática de zonas moleculares y filtrado. Concepto del método	164
7.2.1.	Procedimiento de detección automática de zonas moleculares y filtrado	166
7.3.	Filtrado de las señales lidar en zonas aerosólicas y transición con las zonas moleculares	170
7.4.	Errores del método de filtrado	173
7.4.1.	Cálculo de los errores	173
7.4.2.	Error en el filtrado de las señales elásticas	174
7.4.2.1.	Comparación con el método de filtrado de media móvil	177
7.4.3.	Error en el filtrado de las señales Raman	177
7.4.3.1.	Comparación con el método de media móvil	180

7.5. Conclusiones	180
8. Inversión y análisis de errores de las señales elásticas y Raman del lidar multiángulo	181
8.1. Introducción	182
8.2. Inversión de señales lidar para la obtención de la transmisión atmosférica .	182
8.2.1. Método de inversión de la señal lidar elástica	182
8.2.2. Método de inversión de la señal elástica a dos ángulos (TAM: Two Angle Method)	186
8.2.3. Método de inversión de la señal lidar Raman	188
8.2.4. Conclusiones acerca de los métodos de inversión. Descripción del método de inversión integral a utilizar	190
8.3. Caracterización de los métodos de inversión. Aplicación en señales sintéticas y caracterización por medio de la propagación de sus errores aleatorios y sistemáticos	192
8.3.1. Errores de inversión del método TAM	193
8.3.1.1. Propagación del error aleatorio de la señal lidar elástica en los resultados de la inversión TAM	194
8.3.1.2. Errores sistemáticos asociados al método de inversión TAM	196
8.3.1.3. Errores totales del método de inversión TAM	198
8.3.2. Errores de inversión del método Raman	199
8.3.2.1. Propagación del error aleatorio de la señal lidar	200
8.3.2.2. Errores sistemáticos asociados al método de inversión Raman	202
8.3.2.3. Errores totales del método de inversión Raman	204
8.4. Procesamiento de las señales lidar adquiridas	204
8.5. Conclusiones	207
9. Trabajo futuro	209
10. Conclusiones	213
A. Algoritmo de simulación de la función overlap	237
A.1. Introducción	237
A.2. Conceptos ópticos utilizados	237
A.3. Implementación con el <i>software</i> NetLogo	238
A.3.1. Sistema de referencia utilizado	239
A.3.2. Utilización del software	240
A.3.3. Modo de Operación	240
A.3.3.1. Descripción de los controles	240
A.3.3.2. Operación del programa	242
A.4. Matemática utilizada	242
A.4.1. Consideraciones ópticas para el análisis	242
A.4.2. Trazado de rayos	243
A.4.3. Desarrollo	243
B. Comandos de control	247
B.1. Introducción	247
B.2. Comando: *GET***	247
B.3. Comando: *SET***	247

B.4. Comando: *MOTOR*	248
B.5. Comando: *LASER*	249
B.6. Comando: *END***	249
C. Propiedades del error RMS en el procedimiento de detección de zonas moleculares	251
C.1. Introducción	251
C.2. Análisis del error cuadrático medio de la regresión lineal simple. Detección de zona molecular	251
C.3. Falsos positivos del método	253
D. Error relativo del filtrado de la señal lidar. Demostración matemática de su característica invariante con el rango	255
D.1. Introducción	255
D.2. Desarrollo	255

Prólogo

La técnica lidar (acrónimo de LIght Detection and Ranging) opera bajo el mismo principio de un radar (RAdiowave Detection And Ranging) o sodar (SOund Detection And Ranging). Los sistemas lidar utilizan como emisor un láser que envía pulsos hacia el medio a censar, colectando los fotones retrodispersados por medio de telescopios, para finalmente digitalizar y almacenar la señal por medio de la electrónica correspondiente. La inversión de estas señales permite obtener los **perfiles** de diferentes parámetros ópticos del medio medido. Esto es posible gracias a los pulsos extremadamente cortos emitidos por el láser (menores a los 10 ns), logrando resoluciones espaciales de unos pocos metros, siendo superior a las obtenidas por otros instrumentos. También, y gracias al avance de la tecnología láser, se puede considerar a la radiación emitida como monocromática, utilizando en su detección filtros pasa banda para eliminar gran parte de la fuente de ruido externa.

Existen diferentes tipos de lidares, los cuales se diferencian principalmente en la emisión y en los métodos de detección de la radiación. El denominado lidar elástico detecta las mismas longitudes de onda emitidas, siendo el tipo de lidar más utilizado por ser el de construcción más simple. Otros pueden ser: Raman, DIAL (Differential Absorption Lidar), HSRL (High Spectral Resolution Lidar), lidar doppler, etc. Todos ellos hacen uso del mismo principio de emisión/detección de la radiación láser para poder relevar los perfiles de los diferentes parámetros atmosféricos.

La aplicación de estos sistemas para la medición de parámetros atmosféricos ha demostrado ser una herramienta muy útil, logrando entregar perfiles de una gran variedad de parámetros, como por ejemplo: coeficientes ópticos aerosólicos, contenido de vapor de agua, nubes, viento, gases traza y temperatura. Estos sistemas han sido adoptados no sólo por laboratorios dedicados a estudios atmosféricos, si no también por diversos Observatorios dedicados a la astrofísica, como por ejemplo: Fly's Eye, HiRes, MAGIC, Pierre Auger y el Cherenkov Telescope Array (CTA), entre otros. Estas instalaciones poseen grandes telescopios encargados de detectar la fluorescencia o radiación Cherenkov generada en la atmósfera producto del impacto de rayos cósmicos proveniente del espacio exterior. Debido a que la radiación detectada por sus telescopios es atenuada por la atmósfera, es necesario el conocimiento de su atenuación en el sentido y al momento de la medición. Es aquí donde los lidares multiángulo juegan un rol muy importante en el estudio atmosférico de este tipo de Observatorios.

La División Lidar del CEILAP-UNIDEF (MINDEF-CONICET), es parte de la colaboración de los Observatorios Pierre Auger y CTA, los cuales dan origen al trabajo realizado en esta tesis. Se describe en este escrito el proceso de diseño, construcción y análisis de datos realizado.

Resumen

En esta tesis se describe el diseño, construcción y análisis de datos del primer lidar Raman multiángulo de Sudamérica. Este sistema fué construido en base a características definidas por los Observatorios Pierre Auger y Cherenkov Telescope Array, en los cuales se planea instalar. Se realiza una descripción de los criterios de diseño y selección de cada componente, muchos de los cuales son producto de simulaciones.

Una de las características más importantes de este sistema es su alto grado de automatización, tanto en los procesos involucrados en la toma de datos, como en el procesamiento de los mismos. Se desarrolló un *hardware* y un *software* que dota al sistema de estas características, como también, los algoritmos de pre-procesamiento e inversión de sus señales. Todo este trabajo le aporta a la División Lidar la capacidad de nuevos procedimientos en el desarrollo de sus lidares, en la automatización del proceso de adquisición de datos, y en el procesamiento de la inversión de las señales adquiridas.

Agradecimientos

Se me hace muy difícil agradecer un trabajo de tanto tiempo sin quedarse con la sensación de alguna falta, pero hay que intentarlo.

Nada de esto hubiera sido posible si en el año 2004, el Dr. Eduardo Quel, no me hubiese dado la oportunidad de ser parte de la División Lidar del CEILAP. El fué quien me abrió las puertas de este mundo, el cual no quiero dejar de ser parte. Su rigurosidad y diligencia en la toma de decisiones fueron fundamentales para la concreción de las tareas de este trabajo tan complejo.

A mi co-directora, la Dr. Lidia Otero, por la guía brindada a lo largo de la tesis, como en las correcciones de este escrito. Su tesis doctoral fué la primera del país referida a la construcción y análisis de datos de un lidar de aerosoles, la cual, fue una constante referencia para este trabajo.

Al Dr. Pablo Ristori, quien es parte de este proyecto desde sus inicios, aportando su experiencia en el desarrollo de lidares, siendo el principal responsable de la participación de la División Lidar en los proyectos internacionales que enmarca este trabajo.

Al Dr. Alberto Etchegoyen, quien confió en mí desde un primer momento, siendo quien otorgara mi primer beca de doctorado, y responsable de gran parte del financiamiento del lidar. Sus opiniones a lo largo de este proceso fueron de gran ayuda para la organización de los lineamientos y las metas logradas, como también, de los desafíos a futuro dentro de las colaboraciones internacionales.

Al Dr. Elian Wolfram, un amigo y referente en este ámbito, quien no cede en la búsqueda de soluciones a los problemas que le planteo. Su paciencia y capacidad de enseñanza me permiten crecer con cada charla.

A Raul D'elia, quien gracias a su habilidad para los trabajos mecánicos y eléctricos, como las creativas soluciones a los problemas planteados en cualquier ámbito del lidar fueron muy importantes para el desarrollo del sistema. Pero por sobre todas las cosas, lo que más le agradezco es contar con su buen humor todos los días.

A mis compañeros y amigos de la División Lidar, los cuales hacen que ir a trabajar sea un placer: Facundo, Ezequiel, Gabriela, Belén, Marcelo, Mirta, Silvina, Sebastián, Yoji, Jacobo, Andrea, Claudio y Jérica.

A Miguel, quien se sumó al proyecto luego de su paso por la Antártida, y se hizo cargo con gran profesionalismo y responsabilidad los trabajos de mecánica del lidar.

A Fernando Chouza, quien antes de su partida hacia Alemania trabajó fuertemente en el desarrollo de la electrónica de este lidar. Su gran espíritu crítico me permitió realizar grandes avances, tanto los relacionadas con el *hardware* como en los métodos de análisis de señales desarrollados en este trabajo.

A Juan Carlos Dworniczak y Guillermo Acosta, por el diseño y realización de la electrónica del lidar.

A Osvaldo, responsable de la óptica del sistema. Debido a su gran experiencia en una gran cantidad de temas, hizo que sus opiniones sean referencia constante en cada paso de

la construcción.

A Francisco Gonzalez, Mario Proyetti y todo el taller de prototipos de CITEDEF, por el diseño y desarrollo de la mecánica de este trabajo.

Al Dr. Diego Melo, quien me supo guiar y corregir esta tesis, tanto en la redacción cómo el análisis de datos.

Al Dr. Lucas Bali, su excelencia como persona y como profesional me permite aprender en cada reunión. Espero que el vinculo iniciado siga dando sus frutos en el futuro.

Y finalmente, no puedo terminar estos agradecimientos sin nombrar a los pilares de mi vida. A lo largo de todo este camino, si hay algo que aprendí muy bien es que una tesis de doctorado no sólo se realiza con un equipo de doctores, ingenieros y técnicos, si no también con el apoyo la familia y amigos. Por lo que no puedo dejar de nombrar al amor de mi vida, Mónica y a mis padres Mabel y Vicente: todo este esfuerzo es por ellos. A mis amigos: Alejandro, Miguel y Emiliano, que siempre me apoyaron en todo momento, y soportaron sin enojos mis ausencias a lo largo del desarrollo esta tesis.

A todos, muchas gracias.

Capítulo 1

Introducción

El año 2004 ingresé a trabajar *ad-honorem* en la División Lidar del CEILAP (CITEDEF-CONICET), lo que me permitió aprender diversas técnicas de detección remota de la atmósfera. Ese mismo año, el grupo pasa a formar parte de la colaboración argentina del Observatorio de rayos cósmicos Pierre Auger [1].

Por ese entonces, la División contaba con 10 años de experiencia en la construcción y análisis de datos de un lidar de aerosoles [2] [3] [4] para la medición de parámetros ópticos en la capa límite atmosférica [5] [6] [7], como también, estudios de quema de biomasa y cirrus [8] [9]. Ese mismo año se publican los resultados de un nuevo sistema lidar multilongitud de onda construido en el CEILAP [10]. En el año 1995, y en colaboración con el CNRS de Francia, se comienza a trabajar con la técnica DIAL (Differential Absorption Lidar) [11] [12], la cual es utilizada para la medición de perfiles ozono estratosférico. Diez años más tarde (2005), y con un importante apoyo de la JICA (Japan International Cooperation Agency) este sistema lidar se trasladó a la ciudad de Río Gallegos, donde realiza desde entonces mediciones del agujero de ozono en su paso sobre dicha ciudad [13].

Para el año 2004, el Observatorio Pierre Auger contaba con 3 de sus 4 lidares elásticos multiángulo en funcionamiento, y el aporte de la División Lidar se basaba en realizar mejoras en la calidad de sus telescopios. Las primeras pruebas constaban de reemplazar un telescopio del lidar del sitio Los Leones por uno aportado por el CEILAP, el cual, contaba con algunas diferencias significativas. El telescopio propuesto, además de la mejora en la calidad óptica, colectaba los fotones por medio de una fibra óptica en su foco, mientras que los lidares del Observatorio por medio de un fotomultiplicador. Luego de varias pruebas, los trabajos debieron suspenderse debido a problemas de estabilidad mecánica del láser, lo que hacía perder la alineación de nuestro telescopio. Estas primeras experiencias nos sirvieron para aprender acerca de la necesidad de estabilidad mecánica entre el láser y los telescopios que debe poseer el sistema. Agotadas todas las pruebas, se tomó la decisión de enfrentar la construcción de un nuevo lidar multiángulo en la División Lidar. El mismo, debía cumplir con las necesidades del Observatorio, aportando mejoras con respecto a los lidares ya existentes.

El primer aporte de la División hacia la colaboración fue por medio de un informe interno [14], donde se comparan las señales obtenidas por un sistema lidar de aerosoles convencional, como los de la División Lidar, con uno de alta repetición láser, como los que posee el Observatorio. El hecho de contar con una emisión de mayor frecuencia, se debe a la necesidad de bajar la energía por pulso, para reducir la interferencia a los telescopios de fluorescencia del Observatorio. Para el año 2008, la construcción del lidar Raman multiángulo ya estaba en marcha.

Durante el año 2010, la División Lidar pasa a formar parte de una nueva colaboración internacional: el Observatorio Cherenkov Telescope Array (CTA). Esta colaboración formada por 31 países busca dar un paso significativo en el estudio de radiación Gamma galáctica y extra-galáctica. Este Observatorio, necesita de la caracterización atmosférica en tiempo real de la misma manera que el Observatorio Pierre Auger, haciendo que las características del instrumental para la detección de las propiedades ópticas atmosféricas sean las mismas. Es por este motivo que la División Lidar pasa a formar parte, aportando otro lidar Raman multiángulo.

Se describe en este capítulo los conceptos básicos de las técnicas lidar necesarias en esta tesis, junto con las ecuaciones que rigen el comportamiento de sus señales. Luego, se introducirán a los Observatorios que enmarcan este trabajo, haciendo énfasis en las necesidades para el estudio atmosférico y poder enunciar las características que debe cumplir el lidar. Cada una de estos puntos se revisarán a lo largo de los capítulos de esta

tesis, describiendo todas las etapas de diseño, construcción y análisis de datos.

1.1. Sistema lidar. Características generales

El nombre lidar proviene del acrónimo en inglés de “Ligth Detection And Ranging”, lo que se puede traducir como “detección de luz y telemetría”. El principio de funcionamiento es el mismo del radar: se emite radiación electromagnética y se detectan los fotones retrodispersados para su posterior análisis.

La utilización de este principio es variada, por lo que es utilizada en diversos rubros, como la medición de velocidad en vehículos, la obtención de relieve topográfico [15] o para la medición de diversos parámetros atmosféricos [16] [17], logrando obtener desde parámetros ópticos hasta velocidad de viento [18]. Una clase de medición muy requerida últimamente por la colaboración internacional, es el estudio de plumas volcánicas, cuyo estudio es muy útil para la aeronavegación [19] [20].

Se describe a continuación las características generales del sistema lidar desarrollado en este trabajo, el cual se pueden definir 3 partes principales:

Emisión: formada por un láser, cuyas longitudes de onda son función del tipo de lidar y el parámetro atmosférico que se desea medir. El láser más utilizado en los lidares de aerosoles son del tipo Nd:YAG, con longitudes de onda de emisión de: 1064, 532 y 355 nm .

Recepción: La recepción consta de telescopios, generalmente de tipo Newtonianos o Cassegrain, los cuales colectan los fotones retrodispersados. Estos fotones, son colectados en el foco del telescopio por una fibra óptica que los conduce hacia una caja espectrométrica, en la cual se realiza el filtrado de las longitudes de onda necesarias para la medición. En el caso del lidar realizado en este trabajo, se detectan las denominadas longitudes de onda elásticas: 355, 532, 1064 nm , y las inelásticas, provenientes de la dispersión Raman del nitrógeno para las longitudes de onda de 355 y 532 nm , las cuales son 387 y 607 nm respectivamente.

Detección y almacenamiento: Para cada una de las longitudes de onda que se desea detectar, la caja espectrométrica posee detectores de luz (fotomultiplicadores), encargados de generar una corriente en función de los fotones recibidos. Esta señal es digitalizada por una electrónica de adquisición, y almacenada en una PC para su análisis.

En la figura 1.1.1, se observa un diagrama básico de un lidar.

Tanto la energía del láser, como el área de colección y las eficiencias de los componentes ópticos son esenciales para la intensidad de la señal lidar resultante. En este trabajo, se analiza cada una de las partes constitutivas del sistema para adaptarse a las necesidades pedidas.

1.1.1. Ecuaciones del sistema lidar elástico

Se describe en esta sección las ecuaciones que describen a las señales lidar elásticas. Estas son enunciadas bajo algunas premisas simplificadoras:

1. No se considera dispersión múltiple. En [22] se demuestra que el efecto de la dispersión múltiple debido a aerosol troposférico es despreciable, siendo solamente significativos en nieblas y nubes.
2. Todos los efectos ópticos se consideran monocromáticos a la longitud de onda en estudio.

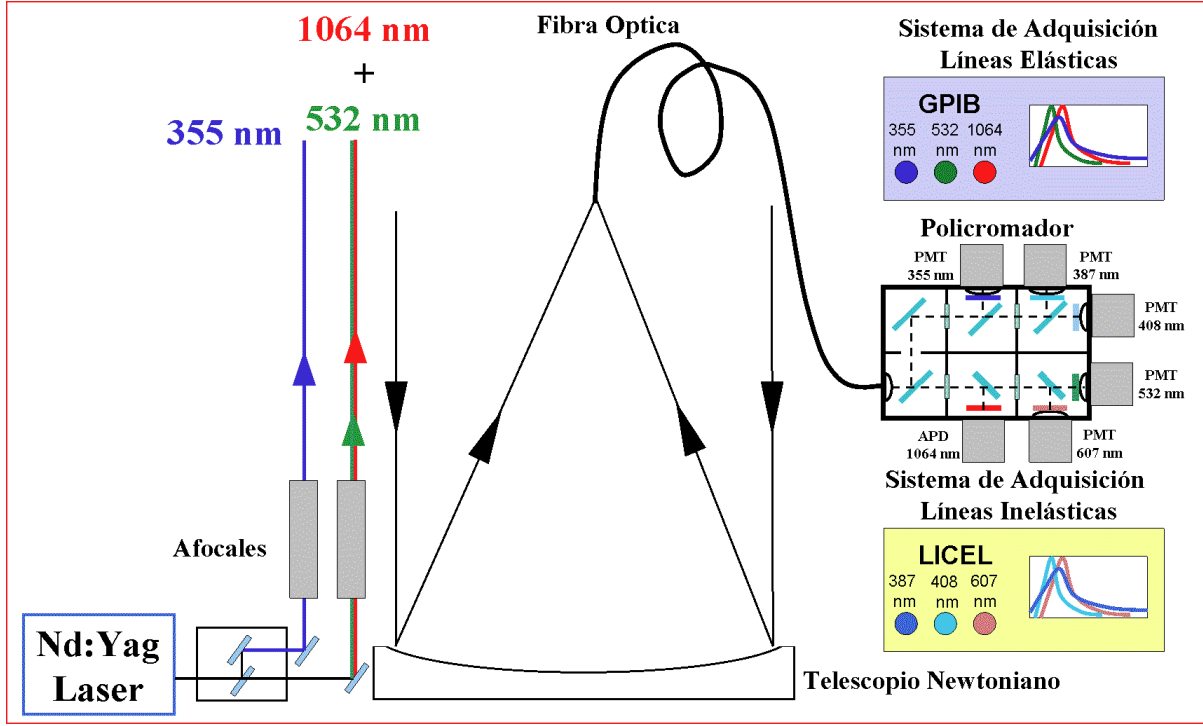


Figura 1.1.1: Diagrama esquemático de un lidar, donde se pueden observar las principales partes. [21].

Una de las formas básicas de escribir la ecuación lidar elástica es:

$$P(r) = K_i \cdot \frac{O(r)}{r^2} \cdot \beta^t(r) \cdot e^{-2 \int_0^r \alpha^t(r) dr} \quad (1.1.1)$$

donde:

r : Es la distancia desde el sistema lidar a la zona de la atmósfera sensada. A lo largo de esta tesis, si se tiene que explicitar que la señal lidar es tomada en la vertical (angulo cenital igual a cero), se representará esta variable con la letra z .

K_i : Es la constante de instrumental, la cual posee las eficiencias ópticas de todo el sistema, como la energía del láser y el área total de colección.

$O(r)$: Factor de *overlap*. Esta es una medida de la cantidad de fotones de *backscattering* que capta el telescopio para diferentes alturas. Depende principalmente de la divergencia del haz láser, el campo de visión del telescopio, la distancia y la alineación relativa entre ambos. En el capítulo 6 y en el apéndice A de esta tesis, se estudia este factor en detalle.

$\alpha^t(r)$: Coeficiente de extinción total, formado por la extinción aportada por los aerosoles y las moléculas.

$\beta^t(r)$: Coeficiente de *backscattering* total de la atmósfera, formado por el *backscattering* aportado por los aerosoles y las moléculas.

Explicitando los parámetros $\alpha^t(r)$ y $\beta^t(r)$ en sus componentes molecular y aerosólicas se tiene:

$$\begin{cases} \alpha^t(r) = \alpha^m(r) + \alpha^p(r) \\ \beta^t(r) = \beta^m(r) + \beta^p(r) \end{cases} \quad (1.1.2)$$

y reemplazándolas en la ecuación 1.1.1:

$$P(r) = K_i \cdot \frac{O(r)}{r^2} \cdot [\beta^m(r) + \beta^p(r)] \cdot e^{-2 \int_0^r [\alpha^m(r) + \alpha^p(r)] dr} \quad (1.1.3)$$

El objetivo principal del procesamiento de esta señal consta de obtener el valor de la transmisión de las partículas, cuya expresión está formada por:

$$T_p(r) = e^{-\int_0^r \alpha^p(r) \cdot dr} \quad (1.1.4)$$

En el análisis de las ecuaciones lidar, las incógnitas son los parámetros $\alpha^p(r)$ y $\beta^p(r)$, ya que las componentes moleculares son obtenidas por medio de los datos de presión y temperatura aportado por radiosondeos. Por lo tanto, la ecuación lidar elástica posee 2 incógnitas, haciendo que su inversión necesite de información extra para su inversión. Esto será tratado en el capítulo 8.

Es muy común para el procesamiento como también para una mejor representación gráfica, expresar la señal lidar “corregida en rango”. Esto significa expresar $P(r) \cdot r^2$, lo que en este trabajo se denominará como $S(r)$. Por lo que la ecuación 1.1.3 queda como:

$$P(r) \cdot r^2 = S(r) = K_i \cdot O(r) \cdot [\beta^m(r) + \beta^p(r)] \cdot e^{-2 \int_0^r [\alpha^m(r) + \alpha^p(r)] dr} \quad (1.1.5)$$

Un ejemplo de una señal lidar típica medida, junto con su expresión corregida en rango se observa en la figura 1.1.2.

Se observa que en la señal corregida en rango se logra una “amplificación” para los rangos lejanos, resaltando estructuras que en la señal pura son más difíciles de detectar. Esta forma de representar a las señales lidar es muy útil, no sólo para su visualización, si no también para su procesamiento. Otro detalle a remarcar en la señal lidar de la figura 1.1.2 es que para rangos de la señal libre de aerosoles/nubes, el perfil decae según su característica molecular definidos por $\beta^m(r)$ y $\alpha^m(r)$.

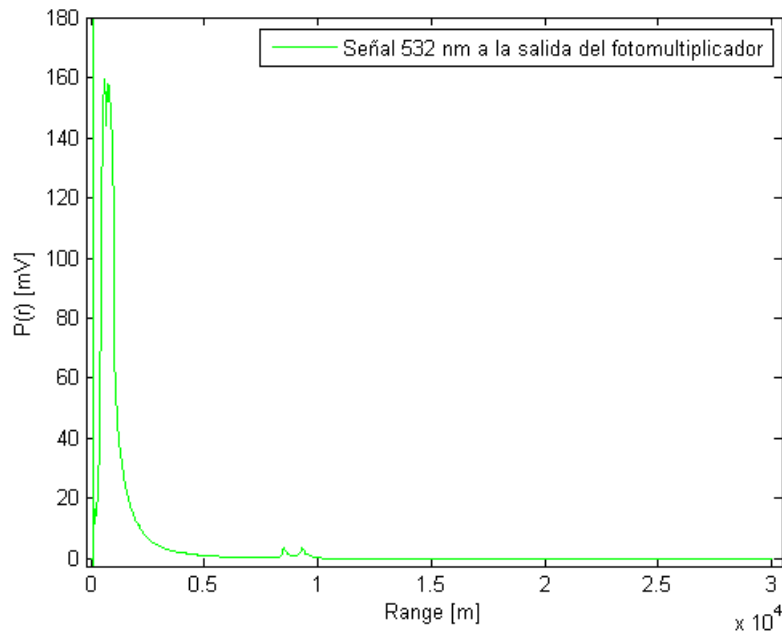
En el caso del lidar multiángulo, el láser y la óptica de recepción se montan sobre un sistema de escaneo acimutal/cenital, pudiendo relevar parámetros ópticos en diferentes coordenadas. Se muestra en la figura 1.1.3 un diagrama esquemático del mismo.

Un desafío muy importante en la construcción de este tipo de sistema es la estabilidad mecánica entre el láser y el eje del telescopio, la cual, debe mantenerse estable a lo largo del barrido del cielo. Variaciones en esta alineación producen cambios en la señal lidar, generando problemas en su posterior análisis. En esta tesis se ha realizado un sistema de auto-alineación de la óptica de recepción, para minimizar los problemas de pérdida de señal debido a desalineaciones (capítulo 6).

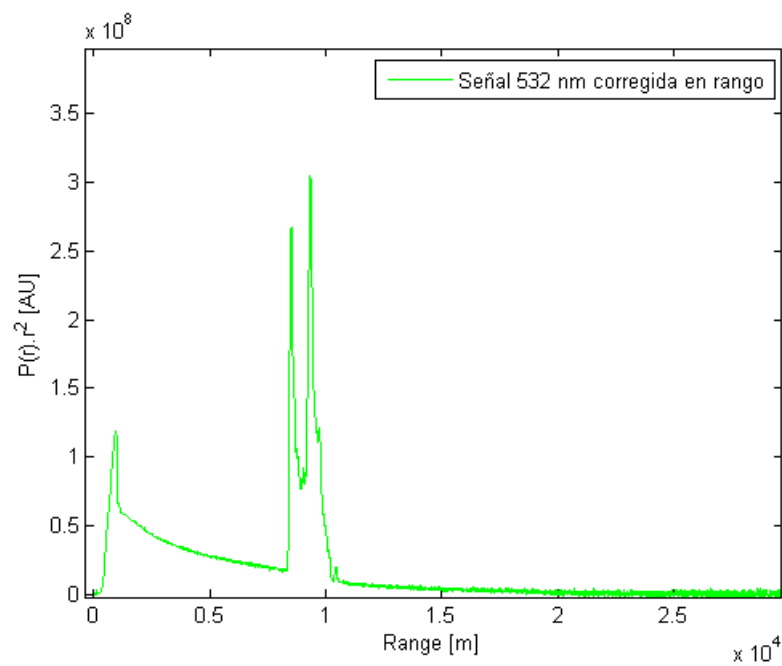
Para el análisis de las ecuaciones elásticas obtenidas a ángulos cenitales diferentes a cero, es necesario para su análisis escribirlas en función de la altura, representada por la letra z . Para esto, y considerando que una señal elástica fue tomada a un ángulo cenital φ , se la reescribe en términos de la altitud z como:

$$P(r) = K_i \cdot \frac{O(r)}{r^2} \cdot \beta^t(r) \cdot e^{-2 \int_0^r \alpha^t(r) dr} = K_i \cdot \frac{O(z)}{z^2 / \cos(\varphi)^2} \cdot \beta^t(z) \cdot e^{-\frac{2}{\cos(\varphi)} \int_0^z \alpha^t(z) dz}$$

Esta conversión es muy importante al momento de la inversión de las señales elásticas adquiridas en modo multiángulo (capítulo 8), ya que se trabajan en conjunto con las señales adquiridas en la vertical. Esto obliga a que cada punto de la señal esté referenciado a la misma altura de la atmósfera, pudiendo combinar las señales convenientemente.



(a)



(b)

Figura 1.1.2: (a) Señal lidar cruda a la salida del fotomultiplicador y (b) señal lidar corregida en rango.

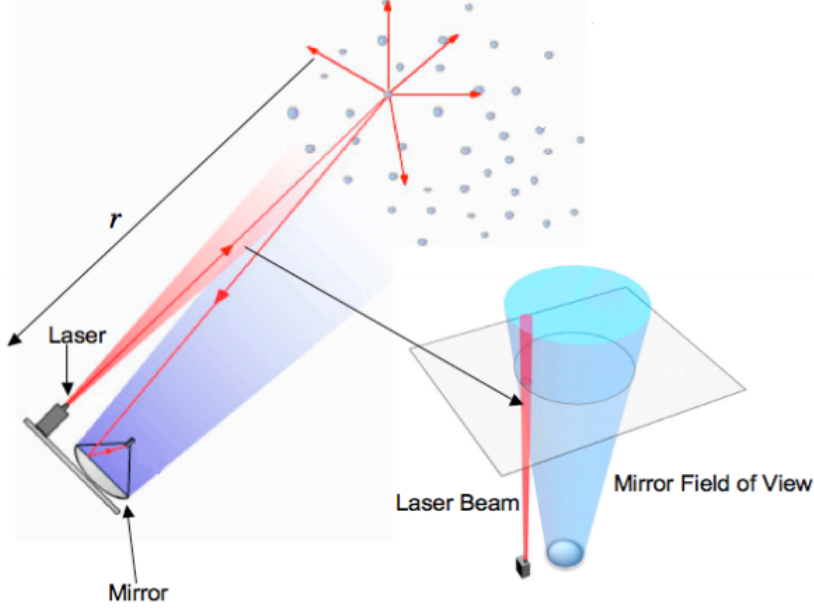


Figura 1.1.3: Diagrama esquemático de un lidar multiángulo [23].

1.1.2. Ecuaciones del sistema lidar Raman

El lidar Raman de este trabajo hace uso de la emisión de luz generada por las moléculas de nitrógeno atmosférico al ser excitadas por los fotones emitidos de 355 y 532 nm, las cuales son 387 y 607 nm respectivamente. Debido a que la radiación generada por la molécula no posee la misma longitud de onda de la radiación incidente, es que se la suele denominar “interacción inelástica”. Esto genera que la ecuación lidar Raman contenga ambas longitudes de onda: la de excitación o láser (L) y la de emisión Raman de nitrógeno (R). Se observa en la siguiente expresión la ecuación lidar Raman:

$$P(\lambda_L, \lambda_R, r) = K_i O(r) \beta^R(\lambda_L, \lambda_R, r) e^{-\int_0^r [\alpha^t(\lambda_L, r) + \alpha^t(\lambda_R, r)] r dr} \quad (1.1.6)$$

donde

r : rango de la medición.

K_i : constante de instrumental. Esta constante es diferentes a la constante elástica, ya que posee eficiencias a diferentes longitudes de onda.

$O(r)$: factor de overlap.

$\beta^R(r)$: coeficiente de *backscattering* Raman. Expresa la proporción de fotones retro-dispersados Raman λ_R , para una excitación a la longitud de onda λ_L .

$\alpha^t(\lambda_L, r)$: coeficiente de extinción total (moléculas más aerosoles), a la longitud de onda láser λ_L .

$\alpha^t(\lambda_R, r)$: coeficiente de extinción total (moléculas mas aerosoles), a la longitud de onda Raman λ_R .

Tanto las componentes moleculares de extinción, como el coeficiente de backscattering Raman, son datos obtenidos por medio de radiosondeos, por lo que la ecuación sólo posee como incógnitas a las extinciones de los aerosoles a las longitudes de onda láser y Raman. Estos dos parámetros se pueden relacionar por medio de la ley de Ångström (ver sección 2.3.2.1 del capítulo 2), por lo que la obtención de la extinción de los aerosoles es relativamente simple. La desventaja de este método es que las señales detectadas son de hasta dos órdenes de magnitud inferior en comparación a las elásticas, resultando un

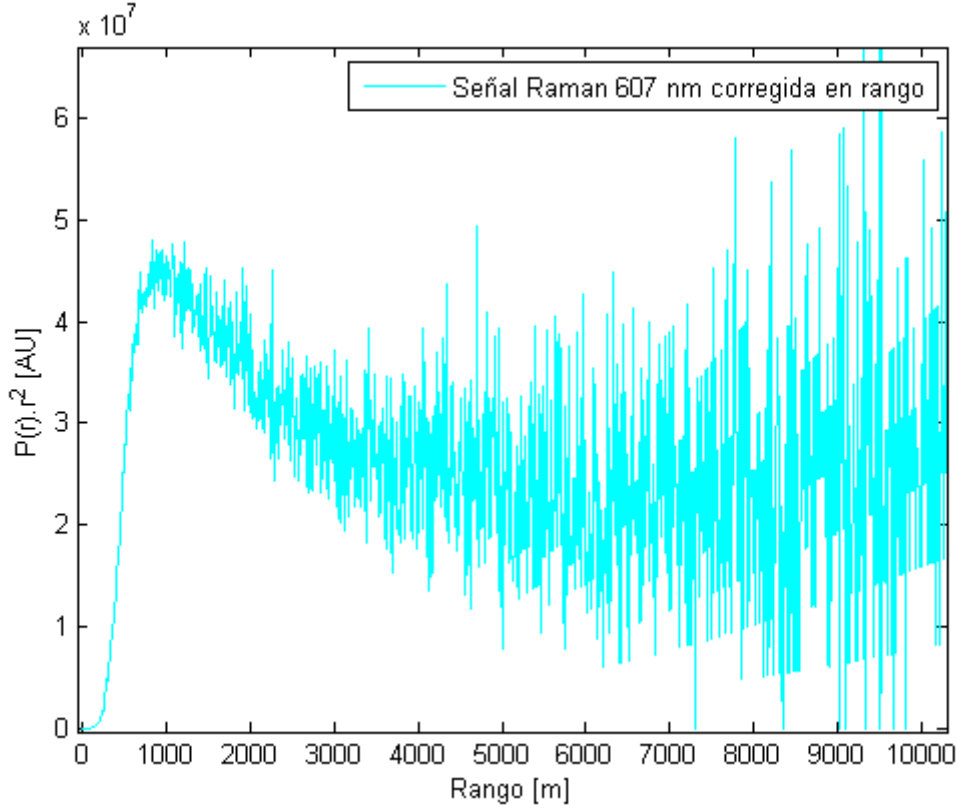


Figura 1.1.4: Señal Raman de 607 *nm* corregida en rango.

procesamiento más difícil, y necesitando de algoritmos de acondicionamiento de la señal. Estos problemas y sus soluciones serán tratados en los capítulos 7 y 8. Se observa en la figura 1.1.4 una señal Raman típica.

Para la adquisición de esta señal se utiliza la técnica de foto-conteo [24] [25], ya que permite una mejor medición de este tipo de señal.

1.2. Observatorio Pierre Auger (OPA) – Observatorio Cherenkov Telescope Array (CTA)

Se describirá a continuación, un resumen de la ciencia que estudian ambos Observatorios, haciendo eje en la necesidad del estudio atmosférico. Estos requerimientos son comunes a ambos, por lo que en la Sub-sección 1.3, se especifican estas necesidades junto con los límites de error impuestos a los resultados de estos equipos.

Ambos Observatorios utilizan a la atmósfera como calorímetro, midiendo los productos generados a partir de la interacción entre el rayo cósmico primario con las moléculas del aire. Esto impone determinadas condiciones para el emplazamiento de los mismos, como por ejemplo, su ubicación entre los 1000 y 3800 *m* sobre el nivel del mar. Esta especificación trae aparejada condiciones ópticas atmosféricas necesarias para la correcta medición de la radiación UV a detectar por sus telescopios.

1.2.1. Observatorio Pierre Auger

El Observatorio Pierre Auger [26] [27] [28] [29] [30], ubicado en la ciudad de Malargüe, provincia de Mendoza, es en primer detector híbrido de tamaño gigante en el mundo, abocado al estudio de los rayos cósmicos de ultra-alta energía (UHECR: Ultra High Energy Cosmic Rays, según sus siglas en inglés), las cuales están por encima de 1 EeV (10^{18} eV). Este Observatorio está formado por una Colaboración Internacional de 18 países, con 500 científicos de 100 instituciones diferentes. Su inauguración formal se realizó el 13 de noviembre de 2008, aunque se encuentra adquiriendo datos en forma estable desde enero de 2004.

Las investigaciones llevadas a cabo por el OPA se basan en la medición de la energía de la partícula incidente, dirección de arribo y su composición, química, origen y los mecanismos capaces de impartirles tan altas velocidades. Estos parámetros son al día de hoy un misterio el cual, proyectos internacionales como el de este tipo intentan resolver.

Los rayos cósmicos mas energéticos ($E > 10^{20}\text{ eV}$) impactan en la tierra en una proporción de 3-4 por kilómetro cuadrado en un siglo. Es por esto, que para incrementar su detección, se necesita de una gran área de colección, razón por la cual la extensión del OPA abarca aproximadamente 3000 km^2 . La forma de medir estos eventos en el Observatorio es por medio de un método híbrido que utiliza detectores de superficie (SD: Surface Detector) y telescopios de fluorescencia (FD: Fluorescence Detector). Un esquema de su emplazamiento geográfico se observa en la figura 1.2.1.

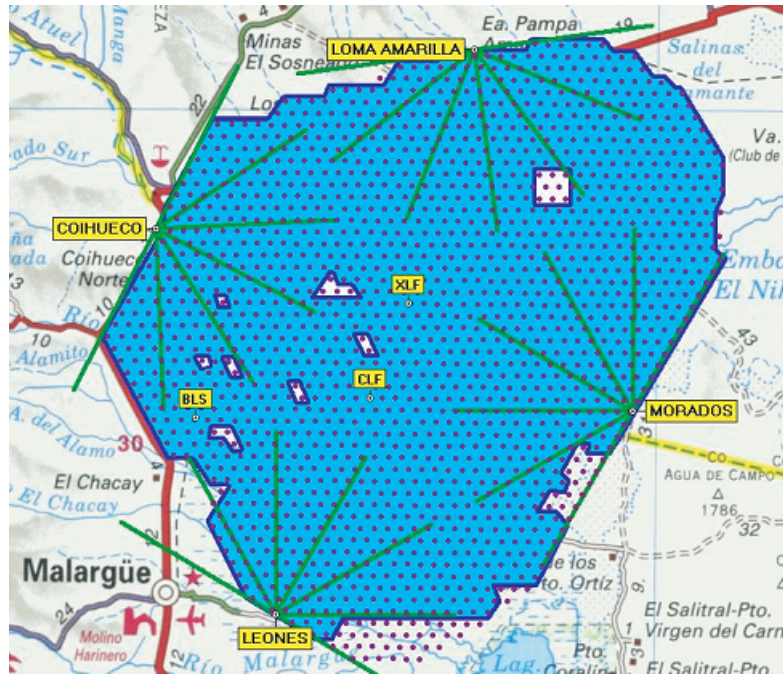


Figura 1.2.1: Arreglo del Observatorio Pierre Auger. Se observa la disposición de los 4 sitios de fluorescencia y los más de 1660 tanques del detector de superficie.[31]

Este arreglo permite la detección de diferentes componentes generadas por el arribo del rayo cósmico primario a la atmósfera. Un esquema de las diferentes partículas subatómicas generadas a partir de la primera interacción, se observa en la figura 1.2.2.

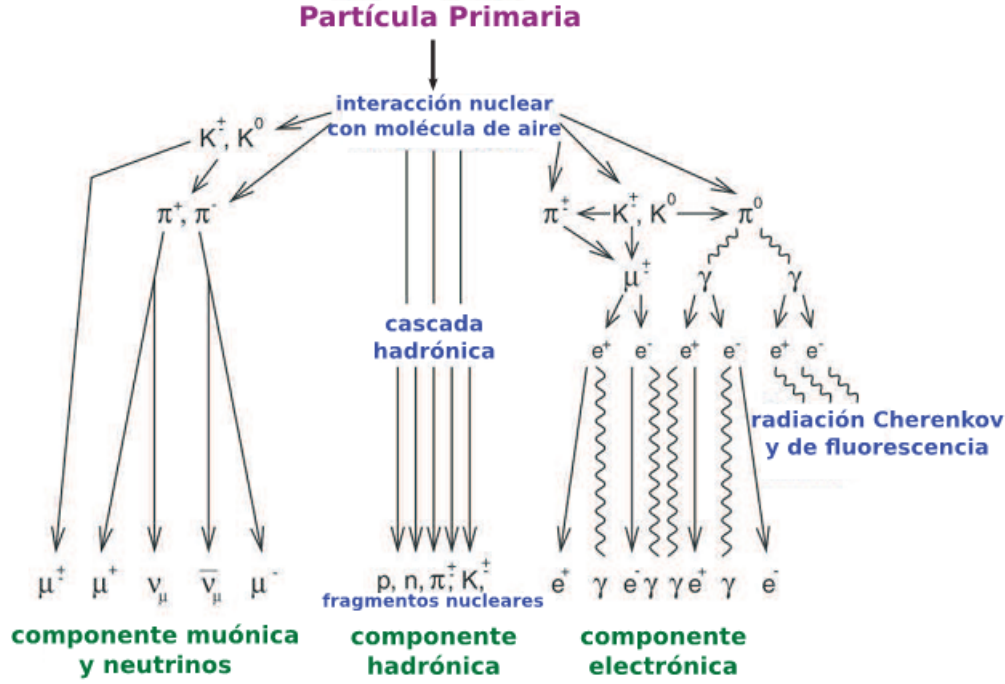


Figura 1.2.2: Desarrollo de una cascada o lluvia de partículas en la atmósfera, donde se indican las componentes principales generadas en la lluvia.[31]

La colisión de una la partícula primaria de alta energía con la atmósfera, produce una lluvia de partículas compuesta esencialmente por: fotones, electrones, positrones, muones y neutrinos. En la figura 1.2.2, se representa esquemáticamente la cascada atmosféricas dividida en sus componentes principales: muónica, hadrónica y electromagnética. Mientras que los detectores de superficie del Observatorio detectan la luz Cherenkov producida por las partículas cargadas que ingresan a los tanques de SD, los telescopios de fluorescencia detectan la radiación electromagnética en el rango del ultravioleta comprendido entre 280 y 440 nm . Esta fluorescencia es generada **isotrópicamente** por medio de las partículas cargadas de la lluvia, las cuales, excitan a las moléculas de nitrógeno de la atmósfera terrestre. La detección de esta fluorescencia por medio de los telescopios de FD, permiten la determinación de la posición máxima del desarrollo de la cascada (representada por X_{max}), la cual, aporta información de la **composición química** del rayo cósmico incidente. Debido a que la radiación UV detectada por el FD fue previamente atenuada por la atmósfera, surge la necesidad de conocer dicha atenuación. Es aquí donde entran en juego los lidares, los cuales deben dar con mayor precisión posible la transmisión de los aerosoles. Otra información importante aportada por los lidares es la presencia de nubes en el campo de visión de los telescopios de fluorescencia.

En la Sección 1.3 se abordará el error en la atenuación que deben proporcionar estos equipos, las cuales son impuestas por el Observatorio en base al error máximo permitido en el cálculo de la energía del rayo cósmico incidente.

Actualmente el Observatorio Pierre Auger posee 4 lidares elásticos multiángulo (junto con cada uno de sus telescopios de fluorescencia), y uno Raman vertical instalado en el centro del arreglo de tanques.

1.2.2. Observatorio Cherenkov Telescope Array (CTA)

El proyecto del Observatorio CTA [32], contempla el diseño, construcción y operación de dos observatorios para la detección de radiación gamma producida por fuentes galácticas y extra-galácticas. A diferencia del Observatorio Pierre Auger, este emprendimiento se encuentra en fase de pre-construcción, y se planea el desarrollo de dos instalaciones, una en cada hemisferio, logrando así una completa cobertura del mapa estelar. Durante el mes de julio de 2015, se han definido los sitios para su emplazamiento: Paranal, Chile, en el European Southern Observatory (ESO); y La Palma, España, en el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), Observatorio Roque de los Muchachos. Este emprendimiento busca cubrir el rango de las muy altas energías (VHE: Very High Energy, según sus siglas en inglés), las cuales cubren el rango de 10 GeV a 100 TeV. Además, este emprendimiento busca mejorar la sensibilidad en la medición del flujo de radiación gamma en un factor de 5-10 con respecto a proyectos actuales como MAGIC [33], HESS [34] y VERITAS [35].

El objetivo científico de este emprendimiento se puede resumir en tres puntos [36]:

- Entender el origen de los rayos cósmicos de naturaleza gamma y su rol en el universo.
- Entender la naturaleza y variedad de los mecanismos de aceleración de las partículas en las inmediaciones de los agujeros negros.
- Buscar la naturaleza de la materia y la física más allá del Modelo Estándar de partículas.

Por este motivo, el Observatorio tendrá un gran potencial en la investigación en áreas como la astronomía, la astrofísica y la física de partículas.

Cada Observatorio CTA está planeado como un *array* de telescopios de diferente tamaño, sensibles a la radiación Cherenkov generada en la atmósfera por las partículas de las lluvias producidas por la radiación gamma incidente desde el espacio exterior. Se muestra en la siguiente figura un diseño conceptual del Observatorio CTA:

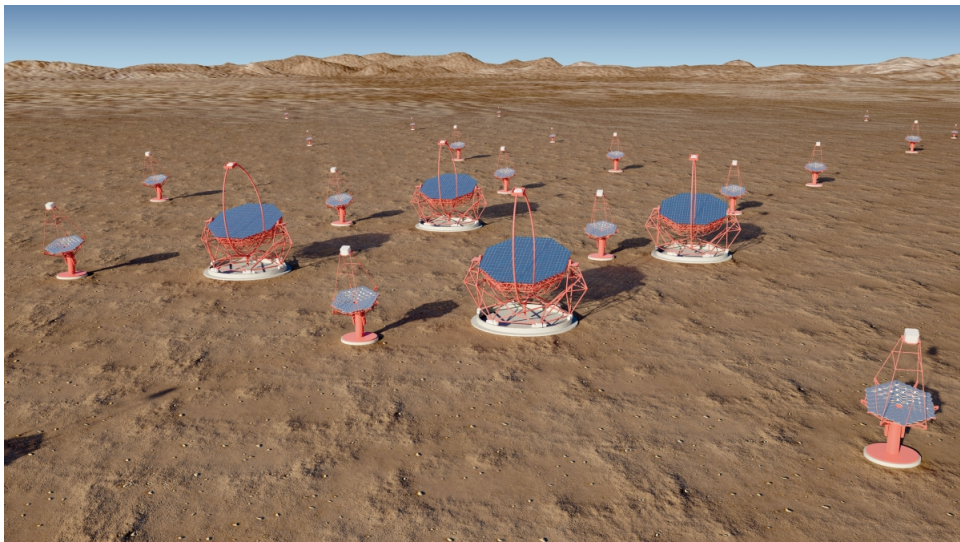


Figura 1.2.3: Diseño conceptual del Observatorio CTA, donde se aprecian los telescopios de diferente tamaño.[37]

Un posible escenario de diseño de estos telescopios, consta de un *array* formado por telescopios de tres diámetros diferentes, con las siguientes características generales:

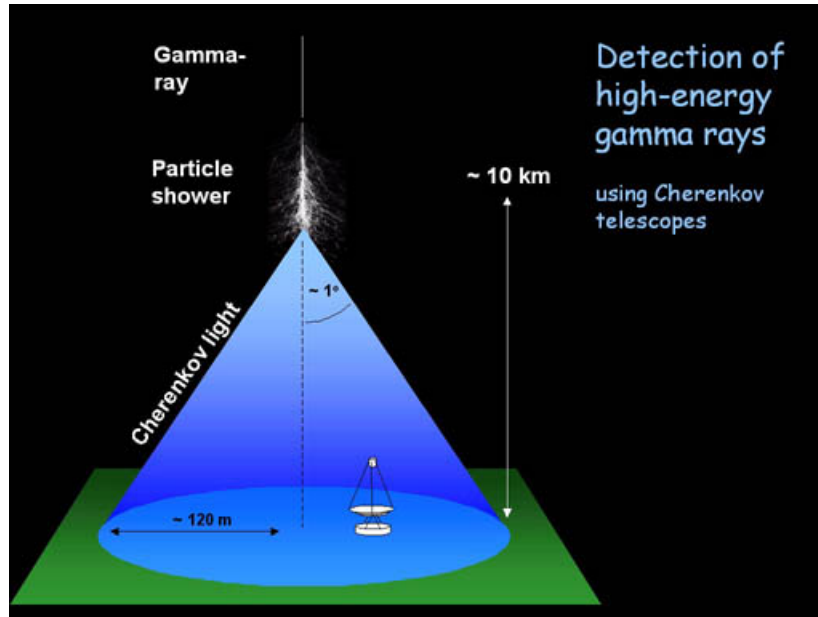


Figura 1.2.4: Representación esquemática de la cascada Cherenkov [39].

- Telescopios de baja energía (10 - 100 GeV), con un diámetro de 24 m, y un campo de visión de 4 a 5 grados. Estos telescopios serán pocos en cantidad en el *array*.
- Telescopios de energía media (100 GeV - 10 TeV), con un diámetro de 10-12 m, y un campo de visión del 6-8 grados.
- Telescopios de alta energía (10 - 100 TeV), con un diámetro de 4-6 m, y un campo de visión del 10 grados. Estos telescopios son cubrirán la mayor parte del *array*.

Esta disposición de de telescopios serán emplazados en una área de unos $3 \times 3 \text{ km}^2$, con los telescopios más grandes en el centro, rodeados por los medianos y finalmente en un anillo exterior, los pequeños.

Estos telescopios tendrán la capacidad de coleccionar la radiación Cherenkov generada en la atmósfera producto de la interacción de la radiación gamma ($\lambda < 10 \text{ pm}$), en un ancho de banda entre 280 a 600 nm [38]. A diferencia de la fluorescencia isotrópica detectada en el Observatorio Pierre Auger, esta radiación Cherenkov tiene la propiedad de mantener el eje del rayo gamma incidente, desplegándose espacialmente en un cono con eje en la dirección del rayo primario, y generando a la superficie de la tierra un círculo de aproximadamente 100 m de diámetro. En la figura 1.2.4 se observa esquemáticamente este proceso.

Se desprende de este resumen la necesidad, al igual que en el Observatorio Pierre Auger, del conocimiento de la atenuación atmosférica para la correcta calibración de la radiación UV detectada por los telescopios. En la siguiente sección, se abordarán los aspectos matemáticos de este problema, y de la solución que proveen los lidares.

1.3. Necesidades del estudio atmosférico en Observatorios

Como se desprende de las descripciones de los Observatorios, es necesario para la calibración de sus telescopios el conocimiento en tiempo real de la atenuación atmosférica

en el rango ultravioleta. Utilizando las técnicas de medición correctas, se logra la reducción de los errores sistemáticos en la reconstrucción de la energía primaria del rayo cósmico [40] [41]. Un lidar multiángulo [42] es el instrumento ideal para medir la transmisión aerosólica, logrando entregar un resultado con márgenes de error por debajo de los impuestos. Se tratará en este capítulo de estas limitaciones que darán lugar al estudio del error en la inversión de las señales, a tratar en el capítulo 8.

No es intención de este trabajo desarrollar las complejas ecuaciones que rigen la reconstrucción de la energía primaria del rayo cósmico incidente, sin embargo, es necesario plantear las relaciones básicas entre la energía del rayo primario y la transmisión atmosférica. Esto dará lugar a las cotas máximas de error que debe entregar el lidar, en base al máximo error impuesto sobre la reconstrucción de la energía.

La intensidad de la radiación UV de fluorescencia/Cherenkov (I_0) generada en la atmósfera, producto del impacto del rayo cósmico primario, es **proporcional** a la cantidad de energía total del mismo (E) [43] [44]. Por lo tanto, se puede escribir:

$$I_0 \propto E$$

Para conocer la intensidad detectada por los telescopios (I_D), debemos afectar a esta última expresión por las transmisiones atmosféricas de las moléculas (T_m) y las partículas (T_p). Por lo tanto [45]:

$$I_D \propto E \cdot T_m \cdot T_p \quad (1.3.1)$$

donde:

I_D : intensidad de la radiación detectada por el telescopio.

E : energía del rayo cósmico primario.

T_m : transmisión atmosférica introducida por las moléculas del aire.

T_p : transmisión atmosférica introducida por las partículas suspendidas en el aire (aerosoles).

En la ecuación 1.3.1 queda en evidencia la necesidad del conocimiento de las diferentes transmisiones atmosféricas T_m y T_p . La expresión de estos factores se expresa a continuación:

$$T_m(r) = e^{-\int_0^r \alpha_m(r) \cdot dr}$$

$$T_p(r) = e^{-\int_0^r \alpha_p(r) \cdot dr}$$

siendo $\alpha_m(r)$ y $\alpha_p(r)$ los perfiles de extinción molecular y de partículas respectivamente. Es aquí donde entra en juego la información aportada por el lidar, ya que por medio de la inversión de sus datos, es posible obtener la transmisión de los aerosoles.

Para conocer las cotas que debe tener el error con el que se debe trabajar, es necesario partir de las condiciones que impone el Observatorio para la reconstrucción de la energía de los rayos cósmicos. Según [46], se tiene que:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta T}{T} \quad (1.3.2)$$

en donde el error relativo en la transmisión molecular es considerado despreciable [45], ya que puede caracterizarse muy bien por medio de datos de radiosondeos lanzados el mismo día de la medición. Por lo tanto, el error en E está gobernado básicamente por

la transmisión aerosólica. El límite del error relativo impuesto en la reconstrucción de la energía debido a la transmisión atmosférica es del 3 % [47].

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta T}{T} < 3\% \quad (1.3.3)$$

Esto impone el error relativo máximo con el que debe medir el lidar Raman multiángulo de este trabajo. Cabe aclarar que la condición observada en 1.3.3 es la más exigente, ya que este límite de error es para los eventos de menor energía que detectan los Observatorios, los cuales corresponden a eventos cercanos a los telescopios. Para eventos más energéticos, el error relativo tolerable en el cálculo de la transmisión aerosólica ($\Delta T/T$) llega al 8 % [47].

Se analizará a continuación cual es la situación atmosférica más exigente para cumplir con la condición impuesta en 1.3.3. Al trabajar con la peor condición, es posible asegurar mejores resultados bajo condiciones normales de trabajo, correspondientes a atmósferas más limpias. También, esto servirá de base para las simulaciones realizadas en el capítulo 3.

A continuación se estudiará el error relativo $\Delta T/T$ para diferentes cargas aerosólicas, definidas por medio del espesor óptico aerosólico. Este parámetro será representado en este trabajo según sus siglas en inglés como AOD: *Aerosol Optical Depth*.

Se parte de los valores reportados en [48], donde se definen los límites del AOD para 355 nm a 5 km a.s.l., lo que representa 3 km medidos desde el lidar:

- Bajo $\implies$ AOD < 0,01.
- Medio $\implies$ 0,04 < AOD < 0,05.
- Alto $\implies$ AOD > 0,1.

Se define para las simulaciones valores de 0,01, y 0,2 para el AOD. Se observa en la figura 1.3.1 el error relativo $\Delta T/T$ en función del error absoluto ΔT para los AOD indicados.

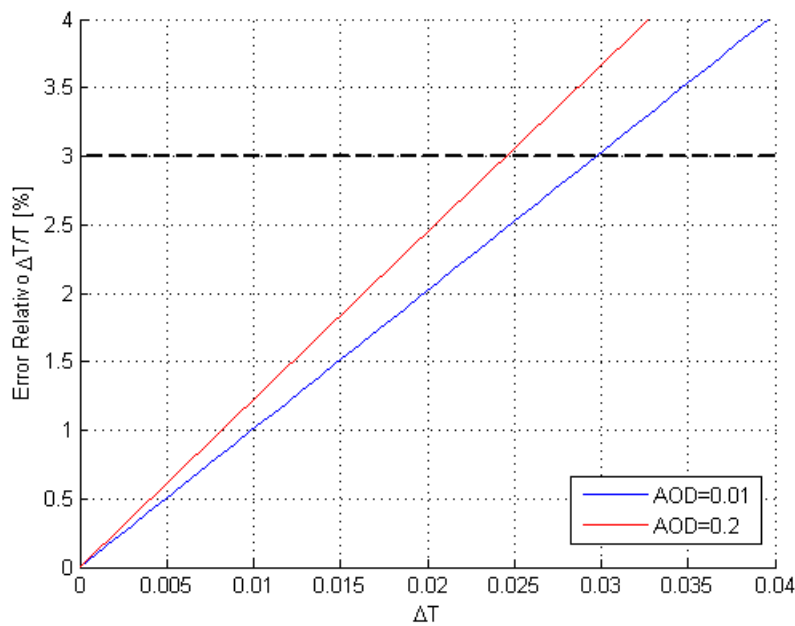


Figura 1.3.1: Error relativo de la transmisión aerosólica ($\Delta T/T$) en función del error ΔT .

De la figura 1.3.1 se concluye que las cargas aerosólicas mayores (mayor AOD) representan una peor condición de trabajo en la limitación del error relativo en la transmisión, ya que a igual error absoluto en ΔT se tiene mayor error relativo $\Delta T/T$. Según la figura 1.3.1, para un error absoluto en la transmisión de 0,025, se está por encima del error relativo impuesto ($\Delta T/T > 3\%$). Esto impone las cotas sobre el error con el que debe trabajar el lidar de esta tesis, por lo que su inversión debe entregar resultados que se encuentran dentro de estos límites. Para lograr estos resultados, los lidares tienen un tiempo limitado de adquisición, ya que la radiación láser emitida producen interferencia en los telescopios de los Observatorios. Actualmente, el esquema de medición del lidar Raman en el Observatorio Pierre Auger es: 12 min antes del *shift*, 12 min durante (con los telescopios de fluorescencia cerrados), y 12 min cuando el *shift* finalizó. Esto limita el tiempo de trabajo de los lidares, lo que hace necesario de un sistema muy efectivo al momento de la medición, logrando perfiles de calidad, adquiridos en poco tiempo y con resultados con bajos niveles de error.

1.4. Especificaciones generales del Lidar a desarrollar en este trabajo

El lidar realizado en este trabajo posee características particulares que difieren de los lidares realizados por el CEILAP. Estas diferencias, están basadas en las necesidades de los Observatorios, tal como se describió en las secciones anteriores. A continuación se resumen a las características generales que debe cumplir el lidar Raman multiángulo desarrollado en este trabajo:

1. Multiángulo. Esto permitirá obtener las características ópticas de la atmósfera a diferentes ángulos acimutales y cenitales.
2. Detección de líneas elásticas correspondientes al láser Nd:YAG utilizado: 355, 532 y 1064 nm. Junto con las líneas Raman, permiten obtener un conjunto completo de datos ópticos atmosféricos.
3. Detección de las líneas Raman de N_2 para las longitudes de onda de 355 y 532 nm. Este tipo de detección, junto con las elásticas, permiten una inversión de los datos de manera independiente, sin el uso de instrumentos de calibración externos.
4. Adquisición rápida de perfiles. Este es un parámetro muy importante en cuanto al funcionamiento del instrumento dentro del Observatorio, ya que la radiación láser emitida, interfiere en la adquisición de los telescopios. Por lo tanto, una medición rápida del lidar reduce las interferencias en las mediciones de los telescopios del Observatorio.
5. Garantizar una buena relación señal/ruido (S/R) en toda la tropósfera (≥ 10 km). De esta manera se asegura una buena calidad de señal, asegurando también la calidad en los resultados de las inversiones.
6. Operación remota por medio de una comunicación inalámbrica. También es posible controlar de manera *in-situ* para tareas de mantenimiento. Este sistema tiene la capacidad de ser controlado desde un centro de control, a través de una PC designada para el control de la adquisición.

7. Operación simple, por medio de un *software* con un alto grado de automatización para los procesos rutinarios de operación. Esta es una característica distintiva realizada en este trabajo, para el cual, se han programado todos los procesos encargados de la operación de cada tarea.
8. Inversión de las señales obtenidas a partir de las cuales se proporcionan los perfiles de atenuación atmosférica manera automática. Se ha realizado también un trabajo de automatización de la inversión de las señales mediante rutinas dedicadas, capaces de detectar parámetros que generalmente son obtenidos a mano.

Cada uno de estos puntos serán revisados y ampliados a lo largo de cada capítulo, desarrollando las soluciones adoptadas.

1.5. Conclusiones

Se presentaron los conceptos básicos de un lidar, junto con las ecuaciones que describen su señal. Las mismas serán utilizados en el desarrollo de esta tesis en los capítulos correspondientes a la inversión de las señales adquiridas. Se describieron también las características generales de los Observatorios en los que enmarca este trabajo, resaltando sus necesidades respecto al conocimiento de las propiedades ópticas de los aerosoles atmosféricos. Se plantearon las cotas de error relativo máximo de la transmisión atmosférica, las cuales imponen los límites en la resolución entregada por el lidar de este trabajo. Esto servirá de guía para la selección de los métodos de inversión a utilizar. Toda esta información permitió la enunciación de las características generales del lidar, las cuales son la base para el diseño de su *hardware* y de su *software*. En los capítulos siguientes se describe la construcción del lidar Raman multiángulo, partiendo en cada caso de sus necesidades y justificando las decisiones de diseño adoptadas para su construcción.

Capítulo 2

Aerosoles atmosféricos y su caracterización óptica

2.1. Introducción

El lidar Raman multiángulo diseñado y desarrollado en esta tesis tiene como objetivo principal medir parámetros ópticos de los aerosoles atmosféricos, principalmente su transmisión óptica en el rango ultravioleta. Se realiza en este capítulo una descripción de la atmósfera terrestre, su contenido molecular y de sus partículas en suspensión. Se presentarán sus propiedades físicas, su clasificación en base a sus parámetros ópticos, y los mecanismos de interacción radiación-materia, los cuales serán de gran importancia al momento de la interpretación de la señal lidar y su inversión (a desarrollarse en el capítulo 8).

2.2. Atmósfera terrestre

A modo de introducción del medio a caracterizar por el lidar multilongitud de onda, se hará una breve descripción de la atmósfera terrestre, destacando principalmente su división en altura y composición molecular.

2.2.1. Capas de la atmósfera terrestre

La atmósfera terrestre se divide en diferentes capas, cada una definida por el gradiente térmico desarrollado sobre ellas. Sus límites dependen de la época del año y la posición terrestre. En la siguiente figura, se puede observar el comportamiento de dicho gradiente junto con los límites aproximados para cada capa.

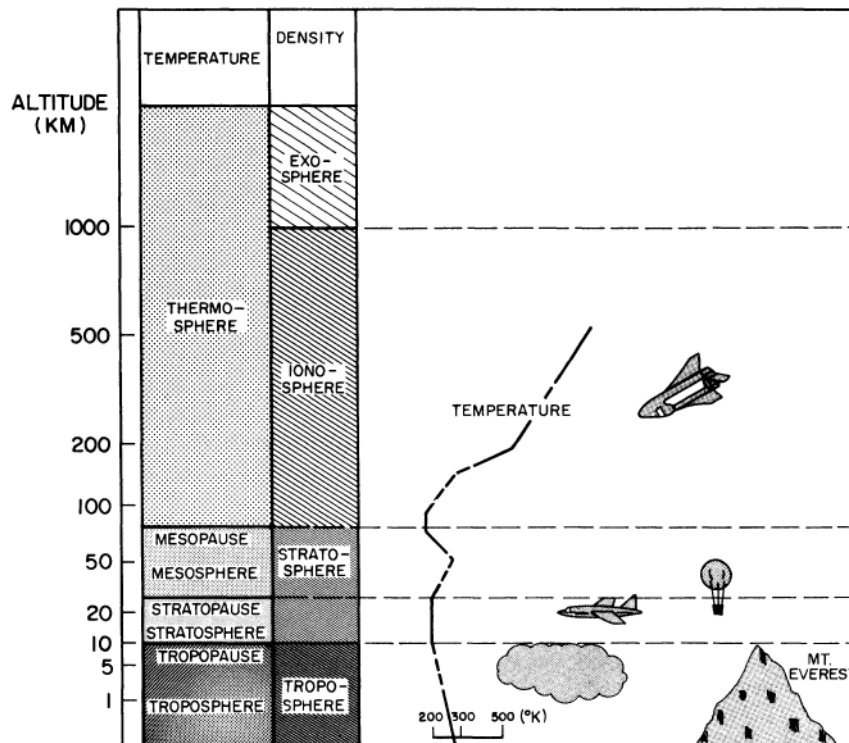


Figura 2.2.1: Diferentes capas de la atmósfera terrestre en función de su gradiente térmico.[49]

A continuación se resumirán las principales características de cada división:

Tropósfera: Se extiende desde la superficie terrestre, siendo su límite superior dependiente del punto geográfico y la época del año. Este valor puede llegar a los 6 *km* en zonas polares hasta los 18-20 *km* en zonas intertropical. Su gradiente de temperatura es negativo, llegando en su punto más alto a valores aproximadamente de -50 °C. Es la capa donde ocurren la mayoría de los fenómenos climáticos debido a que se concentra prácticamente todo el vapor de agua del aire, los núcleos de condensación (formados principalmente por diferentes aerosoles higroscópicos) y la mayores variaciones de temperatura. El 75 % de la masa atmosférica se encuentra en esta capa, y el 99 % debajo de los 30 *km* [21].

Estratosfera: Su extensión se desarrolla desde el fin de la troposfera hasta los 50 *km* aproximadamente, con un gradiente de temperatura positivo. En este rango ubica la capa de ozono, la cual es la encargada de filtrar el 99 % de la radiación solar ultravioleta.

Mesosfera: Se extiende desde los 50 *km* hasta los 80 *km* de altura aproximadamente, con un gradiente negativo de temperatura, alcanzando valores de hasta -80 °C. Contiene solo el 0,1 % de la masa total de aire.

Ionosfera o Termósfera: A esta altura, y debido a la exposición de la radiación solar incidente, la temperatura es función del momento del año y la hora del día, logrando valores de hasta 1000 °C.

Exosfera: Es el límite difuso entre la atmósfera y el espacio interplanetario. Convencionalmente se fija el límite externo de la atmósfera en los 2000 *km*.

Magnetósfera: No contiene gases pero forma una barrera que impide que muchas partículas del espacio lleguen hasta la atmósfera. La mayoría de los satélites que estudian el clima se hallan por sobre ella.

Entre las capas antes mencionadas, existen zonas con características especiales, las cuales son denominadas respectivamente: tropopausa, estratopausa, mesopausa y termopausa. La principal característica en común que poseen todas estas zonas es que el gradiente térmico se anula, dando paso a la transición de signo para la siguiente capa.

2.2.2. Composición de la atmósfera terrestre

El contenido molecular atmosférico, comúnmente denominado “aire”, está formado por una mezcla de gases, el cual el nitrógeno (N_2) y el oxígeno (O_2) forman su composición mayoritaria, en una proporción volumétrica de 78 % y 21 % aproximadamente. Existen además otros gases, denominados **gases traza**, los cuales en su totalidad no llegan al 1 % en volumen de la atmósfera, jugando de todas maneras un rol fundamental en el balance radiativo terrestre. Este contenido molecular atmosférico posee una baja variabilidad espacio-temporal, y sus características son conocidas. El vapor de agua es un componente minoritario, ubicándose principalmente en la parte baja de la atmósfera, con una concentración y distribución espacio-temporal variable. Un mayor detalle de una atmósfera estándar, y la concentración de sus diferentes componentes se pueden ver en el cuadro [2.2.1](#).

Gas	Volumen
Nitrógeno (N_2)	780.840 ppm (78,084 %)
Oxígeno (O_2)	209.460 ppm (20,946 %)
Argón (Ar)	9340 ppm (0,9340 %)
Dióxido de Carbono (CO_2)	400 ppm (0,0400 %)
Neón (Ne)	18,18 ppm (0,001818 %)
Helio (He)	5,24 ppm (0,000524 %)
Metano (CH_4)	1,7 ppm (0,000179 %)
Kriptón (Kr)	1,14 ppm (0,000114 %)
Hidrógeno (H_2)	0,55 ppm (0,000055 %)
Óxido Nitroso (N_2O)	0,3 ppm (0,00003 %)
Xenón (Xe)	0,09 ppm (9×10^{-6} %)
Ozono (O_3)	0,0 - 0,07 ppm (0 % a 7×10^{-6} %)
Dióxido de Nitrógeno (NO_2)	0,02 ppm (2×10^{-6} %)
Yodo (I)	0,01 ppm (1×10^{-6} %)
Monóxido de Carbono (CO)	0,1 ppm
Excluido por ser aire en seco	
Agua (vapor) (H_2O)	~0,40 % a nivel atmosférico, en superficie: 1 % - 4 %

Cuadro 2.2.1: Composición de la atmósfera terrestre [50].

Además de la componente molecular de la atmósfera terrestre, existen partículas en suspensión de diferentes composiciones y tamaños, denominadas **aerosoles atmosféricos**. Estos poseen características muy diferentes al contenido molecular, principalmente en cuanto a su variabilidad temporal y espacial, generando grandes incertezas en el conocimiento de los mismos. En cuanto a las consecuencias más importantes, se destacan su influencia en el balance radiativo terrestre y perjuicios en la salud humana.

En la siguiente sección se abordará estas partículas, haciendo hincapié en el estudio de los parámetros ópticos de las mismas.

2.3. Aerosoles atmosféricos

Los aerosoles atmosféricos son pequeñas partículas sólidas o líquidas suspendidas en la atmósfera terrestre, con tamaños que varían desde unos pocos nanómetros hasta varios milímetros. A diferencia de la componente molecular, su ubicación y concentración son altamente variables en el tiempo, produciendo además, un fuerte impacto en el clima a nivel global y regional, alterando la actividad de los seres vivos.

Su tamaño es superior al de las moléculas, siendo su rango de diámetros típico desde los 100 nm hasta los 100 μm , aunque en casos extremos, pueden llegar hasta 1 mm. Por ejemplo, podemos decir que partículas de humo de cigarrillo poseen un diámetro medio del orden de 1 μm , las partículas de hollín del orden de 10 μm y en el extremo final tenemos la niebla o partículas emitidas por erupciones volcánicas con diámetros de hasta más de 1 mm, [21][51]. El tiempo de permanencia de dichas partículas en la atmósfera depende principalmente de tamaño de las mismas, y se pueden extender desde algunos minutos hasta meses.

Desde el punto de vista del origen, los aerosoles pueden ser del tipo natural o antropogénico. El principal aporte de la actividad humana en la generación de aerosoles es por

medio sulfatos provenientes de la combustión de carbón y petróleo, la cual ha aumentado considerablemente desde el comienzo de la era industrial, siendo actualmente mayor la producción de aerosoles de sulfatos aportada por el hombre que de manera natural. Esta concentración es mayor en el hemisferio norte, donde la actividad industrial es superior. También, pero en segundo lugar, es considerable el aporte por medio de la quema de biomasa. En cuanto al aporte natural, pueden ser originados por erupciones volcánicas, tormentas de polvo, fuegos que se producen en extensiones forestadas, emisión de origen vegetal y marino [21].

En lo que se refiere a los mecanismos de formación, las partículas de aerosol se clasifican en **primarias** cuando son emitidas como tales a la atmósfera, y **secundarias** cuando se generan a través de reacciones químicas, las cuales, pueden ser el resultado de un proceso de condensación, absorción o coagulación, al interactuar la partícula con gases precursores en la atmósfera [52][53].

Los efectos de los aerosoles son muy variados, generando atenuación y retrodispersión de la radiación solar (a desarrollar en la sección 2.4), efectos químicos, al reaccionar en la atmósfera con otros componentes y cambiando sus propiedades, destruyendo la capa de ozono, o directamente efectos en la salud de los seres vivos, ya que pueden resultar tóxicos al ser incorporados por medio de la respiración. Aerosoles con diámetro menor a $2,5\ \mu\text{m}$ pueden producir trastornos respiratorios, irritaciones, asma, inflamación e incluso cáncer, si alcanzan los alvéolos pulmonares [21].

En cuanto a los efectos en el balance radiativo terrestre, se pueden clasificar los efectos directos e indirectos. El efecto directo es el que producen debido a la extinción (absorción o retrodispersión) de la radiación solar, generando una disminución de la temperatura a nivel de superficie [54][55]. El efecto indirecto es debido a la característica higroscópica del mismo, pudiendo funcionar como núcleo de condensación y modificando las características de las nubes. Este efecto se determina estudiando la higroscopía del mismo, dependiente del tamaño, composición química, estado de agregación de la partícula y de las condiciones ambientales [56].

También, los aerosoles formados por metales traza, aun en concentraciones extremadamente bajas, son nutrientes esenciales para el crecimiento del fitoplancton en los océanos [57]. Se ha estudiado que este tipo de aerosoles, depositados en océanos con la ayuda de vientos, tienen un vínculo directa con el clima, ya que afecta la capacidad de la biomasa marina en su consumo CO_2 .

Estos son algunos motivos por los cuales su estudio lo ubica en un lugar de gran interés alrededor del mundo. El estudio de los aerosoles en este trabajo estará centrado en la obtención de sus parámetros ópticos, principalmente su coeficiente de extinción y de retrodispersión.

2.3.1. Redes de medición de los aerosoles

Desde hace ya algunos años se han estado tomando medidas a nivel mundial para conocer la variabilidad espacio-temporal y las propiedades de los aerosoles atmosféricos [55]. Estos esfuerzos han sido en dirección a generar redes de medición de diferentes tipos de parámetros aerosólicos, promovidas por distintos organismos de escala global, como el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC), la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM), entre otros. Desde el IPCC 2011 [58] han aumentado considerablemente el número de estaciones de la red AERONET (AErosol RObotic NETwork) [59], además de la creación de nuevas redes de

detección activas, como: EARLINET (European Aerosol Research Lidar Network) [60], MPLNET (Micro-Pulsed Lidar NETwork) [61], ADNET (Asian Dust NETwork) [62], REALM (Regional East Atmospheric Lidar Mesonet) [63], entre otras [52]. En cuanto a latinoamérica, se pueden nombrar a la red LALINET (Latin America Lidar Network) [64], la cual, agrupa a todos los lidares de la región, y a la red argentina de lidares administrada por la División Lidar del CEILAP. Esta última, cuenta actualmente con 5 estaciones distribuidas en los aeropuertos de las siguientes ciudades de: Villa Martelli (CITEDEF), Ciudad Autónoma de Buenos Aires (aeroparque), San Carlos de Bariloche, Comodoro Rivadavia, Neuquén y Río Gallegos.

Estas redes de medición remota, son llevadas a cabo por medio de mediciones activas, pasivas e *in-situ*. En el caso de las mediciones activas son realizadas por medio de lidares, los cuales pueden estar montados en la superficie terrestre, en barcos, aviones o plataformas satelitales.

En cuanto a los instrumentos de medición pasiva de aerosoles, cabe destacar como los más importantes a los fotómetros solares. Estos instrumentos miden radiación en superficie en diferentes longitudes de onda sobre bandas muy angostas. La red más grande de este tipo de instrumento es AERONET, administrada por la NASA, la cual utiliza instrumentos CIMEL CE318-2. Estos equipos miden la irradiancia solar entre 6 y 10 bandas de espectrales con un ancho de banda FWHM (Full Width Half Maximum) de 10 nm. En base a la medición óptica espectral que realizan estos instrumentos se pueden obtener parámetros atmosféricos como el espesor óptico de aerosoles, agua precipitable, distribución de la irradiancia espectral y cantidad de ozono. También, con la ayuda de los espesores ópticos a diferentes longitudes de onda se pueden obtener el volumen y distribución de tamaños de aerosoles. La División Lidar administra los instrumentos de la red Aeronet en el territorio argentino desde el año 1998, realizando trabajos de análisis de sus datos desde el año 2002 [65] [66].

Estos instrumentos de medición pasiva suelen acompañar a las estaciones lidar, ya que sus datos son muy importantes en el método de inversión de señales elásticas. Haciendo uso de la sinergia entre estos dos instrumentos [67] [21], es posible obtener los perfiles de: coeficiente de retrodispersión, extinción, y espesor óptico, para las longitudes de onda emitidas por el láser (355, 532 y 1064 nm).

2.3.2. Clasificación de los aerosoles

Se describirá en esta sección las bases necesarias para la clasificación de los aerosoles utilizada en este trabajo. Esta clasificación está basada en los productos entregados por el fotómetro solar de la red AERONET, la cual, la División Lidar es parte de la misma desde el mes de octubre del año 1998. Estos instrumentos, por medio de la información radiométrica medida a diferentes longitudes de onda, obtienen diferente información microfísica de los aerosoles. Una de las principales ventajas de esta red es su calibración anual, y que la misma es llevada a cabo por medio de la NASA para todos los instrumentos de su red, asegurando la calidad de sus datos. Además, la distribución de más de 600 instrumentos en todo el mundo permite una caracterización muy amplia por medio de los productos que entrega.

2.3.2.1. Ley de Ångström

La ley de Ångström [68] permite obtener la dependencia espectral de la extinción de los aerosoles (AOD_λ) por medio de la siguiente expresión exponencial:

$$AOD_{\lambda} = \beta_{\lambda_0} \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{-\mathring{a}} \quad (2.3.1)$$

1

donde:

AOD_{λ} : Espesor óptico de los aerosoles.

λ : Longitud de onda de estudio.

λ_0 : Longitud de onda de referencia ($1\mu\text{m}$).

β_{λ_0} : Coeficiente de turbidez calculado a la longitud de onda de referencia (igual al AOD_{λ} si $\lambda = \lambda_0$). No confundir con coeficiente de retrodispersión utilizado en la ecuación lidar.

$\mathring{a}$: **Coeficiente de Ångström**. No confundir con coeficiente de extinción utilizado en la ecuación lidar.

Una característica muy importante de esta ley, es que $\mathring{a}$ es independiente de la longitud de onda, siendo además característico del tipo de aerosol, por lo que es utilizado para la categorización de los mismos.

Por medio de esta ley, y utilizando los datos de instrumentos de medición pasiva (como el entregado por los fotómetros solares), es posible obtener el coeficiente de Ångström (α). Conociendo el AOD a diferentes λ , se realiza el cociente a dos longitudes de onda diferentes:

$$\frac{AOD_{\lambda_1}}{AOD_{\lambda_2}} = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^{-\mathring{a}} \quad (2.3.2)$$

despejando $\mathring{a}$:

$$\mathring{a} = - \frac{\log \left(\frac{AOD_{\lambda_1}}{AOD_{\lambda_2}} \right)}{\log \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)} \quad (2.3.3)$$

Este parámetro es de gran utilidad para la clasificación de aerosoles, ya que tiene una vinculación directa con el tamaño medio de los mismos. Este punto será desarrollado en las siguientes sub-secciones.

Es necesario expresar otra forma de esta misma ley, expresándandola en función del perfil de extinción (α_{λ}). Reescribiendo la ecuación 2.3.1 en términos de este coeficiente, se tiene:

$$AOD_{\lambda} = \int_0^r \alpha_{\lambda}(r) dr = \int_0^r \beta_{\lambda_0} \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{-\mathring{a}} dr = \beta_{\lambda_0} \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{-\mathring{a}} \int_0^r dr \quad (2.3.4)$$

para mayor claridad:

$$\int_0^r \alpha_{\lambda}(r) dr = \beta_{\lambda_0} \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{-\mathring{a}} \int_0^r dr \quad (2.3.5)$$

y derivando a ambos lados:

¹Para evitar confusiones de nomenclatura, se optó por denominar al coeficiente de Ångström con la letra $\mathring{a}$ en vez de α , como se suele encontrar en la bibliografía. Esto es para evitar confusiones con el coeficiente de extinción.

$$\alpha_\lambda(r) = \beta_{\lambda_0} \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{-\dot{a}} dr \quad (2.3.6)$$

por lo que haciendo el cociente de dos $\alpha_\lambda(r)$ a diferentes longitudes de onda se obtiene:

$$\frac{\alpha_{\lambda_1}(r)}{\alpha_{\lambda_2}(r)} = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^{-\dot{a}} \quad (2.3.7)$$

Estos conceptos serán utilizados en el capítulo 8, en la sección 8.2.3, correspondiente al análisis de las señales Raman.

2.3.2.2. Distribución de tamaños

Otra de las propiedades microfísicas de gran utilidad en el estudio de los aerosoles es la distribución de tamaños. Una manera de representar a un conjunto de partículas de diferentes dimensiones es por medio de su distribución de tamaños. Esto es comúnmente representado por medio de la densidad de partículas en un cierto rango de radios:

$$n(r) = dN/d(\ln(r)) \quad (2.3.8)$$

Con N siendo la densidad en columna total de las partículas analizadas. Puede encontrarse también la distribución de tamaños volumétrico, $v(r) = dV/d(\ln(r))$. La utilización de la escala logarítmica en el radio es útil debido al amplio rango de tamaños de las partículas bajo análisis. Para obtener la cantidad de partículas en un rango de radios determinado, se debe realizar la integración:

$$N = \int_{r_1}^{r_2} n(r) \cdot d \ln(r)$$

Una buena modelización matemática de esta distribución, utilizando pocos parámetros ajustables se puede encontrar en [69], la cual, sigue una distribución de log-normal y su expresión es:

$$v(r) = \frac{dV}{d \ln(r)} = \frac{V_0}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{\ln^2(r/r_m)}{2\sigma}\right)}$$

donde r_m y σ son los parámetros ajustables, los cuales significan:

r_m : Radio modal de la partícula. Da la posición del máximo de la curva de distribución.

σ : Desviación estándar del logaritmo de los radios.

V_0 : Volumen de partículas en la columna atmosférica por unidad de sección transversal.

La relación entre $v(r)$ y $n(r)$ se puede realizar mediante la relación:

$$v(r) = \frac{4\pi}{3} r^3 n(r)$$

En la siguiente tabla se puede encontrar el radio medio, mínimo y máximo para los principales componentes que forman a los aerosoles [70]:

Componente	$r_m [\mu m]$	$r_{min} [\mu m]$	$r_{max} [\mu m]$
Insoluble	0,471	0,005	20
Soluble en agua	0,0212	0,005	20
Hollín	0,0118	0,005	20
Sal Marina (modo acumulación)	0,209	0,005	20
Sal Marina (modo grande)	1,75	0,005	60
Mineral (modo nucleación)	0,07	0,005	20
Mineral (modo acumulación)	0,39	0,005	20
Mineral (modo grande)	1,90	0,005	60
Mineral transportado	0,50	0,020	5
Gotas sulfato	0,0695	0,005	20

Cuadro 2.3.1: Características microfísicas de los principales componentes aerosólicos.

A menos que se posea una distribución perfectamente monodispersa, la cual todas las partículas poseen el mismo diámetro, las distribuciones de tamaño se suelen representar como la suma de diferentes distribuciones log-normal. Esto da como resultado una distribución multimodal, como el de la figura 2.3.1, siendo muy común en la atmósfera terrestre encontrar distribuciones del tipo bi-modal. De todas maneras, en la atmósfera terrestre pueden diferenciarse 3 tipos de modos [71]:

- Nucleación: formado por partículas con diámetros modales entre 0,01-0,05 μm , precursoras de la condensación del vapor de agua.
- Acumulación: que está constituido por partículas de 0,2-0,8 μm de diámetro modal, y que permanecen en la atmósfera aproximadamente una semana, pudiendo dar lugar a condensaciones o coagulaciones con partículas del modo de nucleación.
- Partículas grandes: presenta diámetros modales $\geq 3 \mu m$.

La distribución de tamaños es otro de los productos del fotómetro solar, la cual, es obtenida en base a las secuencias de mediciones de radiancia solar almucantar y de plano principal [59]. Con esta información, existen varios métodos numéricos que obtienen la distribución de tamaños de los aerosoles [73][74]. La red AERONET obtiene la distribución de tamaños por medio de la inversión de Dubovik [75][76], entregando un resultado de distribución de tamaño como el que se puede observar en la figura 2.3.2.

El modelo de aerosoles utilizado para esta inversión considera partículas del tipo esféricas y no esféricas, orientados aleatoriamente y con el mismo índice de refracción. En cuanto a su distribución espacial, son considerados de manera homogénea en capas plano-paralelas.

De la figura 2.3.2, la cual es una distribución de tamaños típica para la estación de AERONET instalada en el CEILAP, puede diferenciarse la distribución bi-modal. Esto permite también definir dos modos de partículas: finas y gruesas, donde el límite entre ambas categorías esta definido por el mínimo de la función $dV/d\ln r$ ubicado entre los dos picos modales.

2.3.2.3. Clasificación en base al coeficiente de Ångström y el espesor óptico

El estudio y clasificación de los aerosoles ha sido abordado por diferentes autores [77][78][70][79][80]. Se utilizará en este trabajo un resumen de los valores característicos

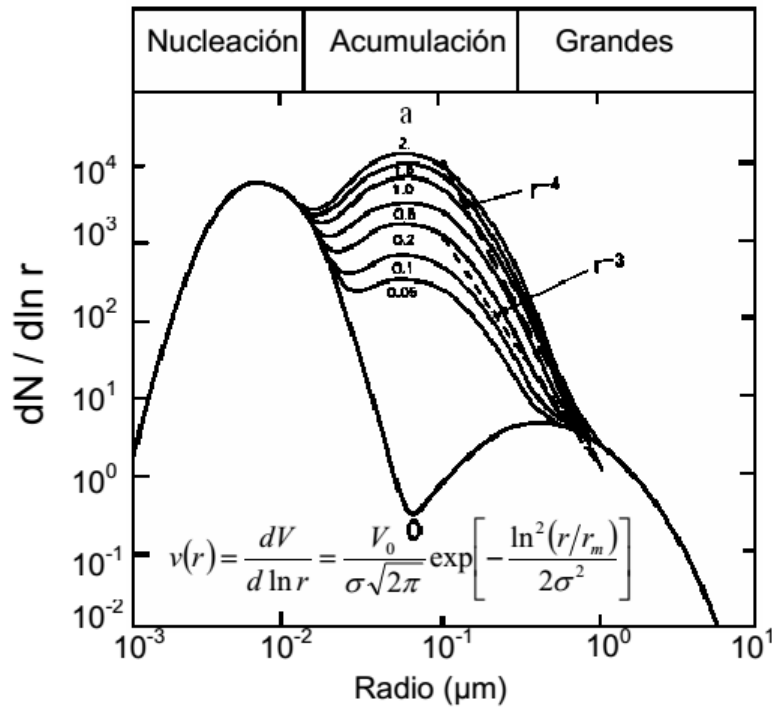


Figura 2.3.1: Tres distribuciones log-normales para diferentes modos de acumulación, definidos por el parámetro “a”. Para $a = 0$ no hay modo de acumulación, $a = 1$ modo de acumulación típico del aire contaminado [72].

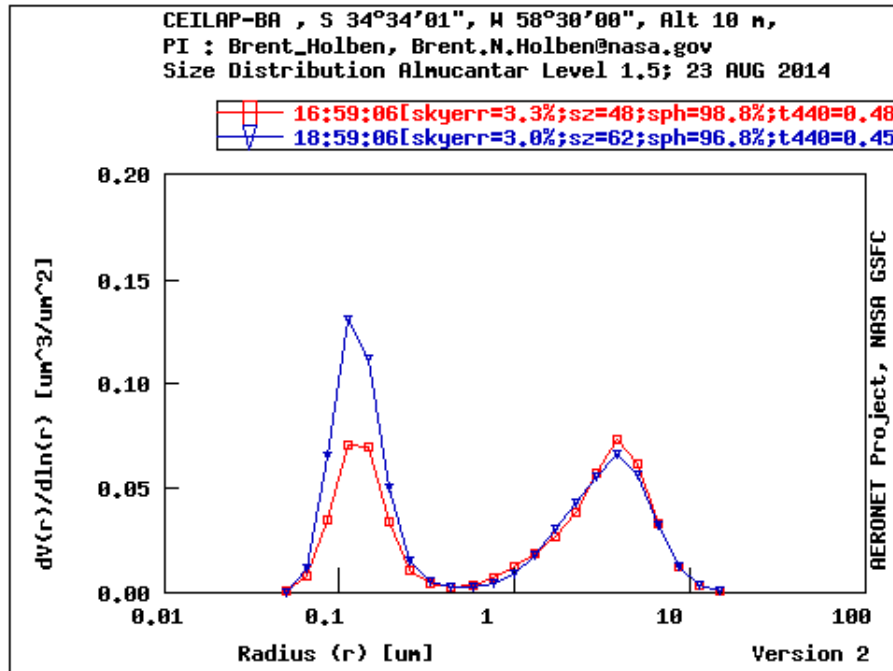


Figura 2.3.2: Distribución de tamaños bi-modal entregada por el instrumento AERONET que posee la División Lidar en Villa Martelli. La misma corresponde al día 23 de agosto de 2004.

utilizado en [21]. En la siguiente tabla, se listan los valores típicos de AOD para $\lambda=440$ nm como referencia, y sus correspondientes coeficientes de Ångström (α).

Clasificación de los aerosoles		
Tipo	AOD_{440}	α
Continental Limpio	0,05-0,15	0,8-1,15
Continental Promedio	0,1-0,3	1-1,7
Continental Contaminado	0,08-0,3	1,5-2,5
Urbanos/Industriales	$>0,25$	$>1,2$
Desértico	$>0,2$	$<0,8$
Marítimo	$<0,15$	$<0,3$
Quema de Biomasa	$>0,2$	1,5-2,6
Antártico	$<0,1$	$<0,8$

Cuadro 2.3.2: Clasificación de los diferentes tipos de aerosoles en base a AOD_{440} y α .

Como puede observarse en la tabla anterior, existen límites difusos para cada tipo de aerosol, existiendo además, zonas de superposición.

Cada uno de estos tipos de aerosoles, están formados por diferentes concentraciones de los componentes listados en el cuadro 2.3.1. Un detalle de sus valores se puede encontrar en [70], donde también se describen otros factores a tener en cuenta para la identificación de los mismos, como:

- Contenido de agua precipitable: altos valores pueden indicar presencia de aerosoles provenientes de la quema de biomasa o marinos. Bajos valores de este parámetro son característicos de aerosoles desérticos (polvo o arena).
- Distribución de tamaños: un primer modo dominante es característico de partículas provenientes de la quema de biomasa o aerosoles industriales, mientras que un segundo modo es característico de polvo o arena.
- Albedo de dispersión simple (o SSA según sus siglas en inglés: Single Scattering Albedo): Este parámetro de una medida de la capacidad de dispersión del medio.

Tantos los aerosoles de quema de biomasa como los desérticos presentan altos valores de SSA. Analizando su pendiente en función de la longitud de onda se puede obtener el tipo de aerosol. Por ejemplo, una pendiente positiva es una característica de aerosoles desérticos, mientras que si es negativa, es característico de quema de biomasa. También, los aerosoles marinos y los urbanos/industriales muestran una pendiente negativa en su dependencia del SSA con la longitud de onda.

Cabe aclarar que la clasificación de los aerosoles puede realizarse desde otros puntos de vista, como por ejemplo, su origen, composición química, si son primarios o secundarios, etc.

2.4. Propiedades ópticas de la atmósfera y sus efectos en la propagación de la radiación

La radiación solar, al atravesar la atmósfera terrestre, interacciona con las moléculas y aerosoles, produciendo un efecto de extinción generado por los efectos de la dispersión

más la absorción. La magnitud de estos procesos son dependientes de muchos factores, como por ejemplo, de las propiedades ópticas de la atmósfera y de la longitud de onda de la radiación incidente.

El fenómeno de **extinción** nos da cuenta de la atenuación que sufre la radiación electromagnética al pasar por un medio. Le ley de Beer-Lambert-Bouger describe la extinción total de un medio heterogéneo por medio de la siguiente expresión:

$$I_{\lambda} = I_{o,\lambda} e^{-\int_0^r \alpha_{\lambda}^t(r) dr} \quad (2.4.1)$$

donde $I_{o,\lambda}$ es la intensidad monocromática incidente al volumen de estudio, I_{λ} es la intensidad saliente, y $\alpha_{\lambda}^t(r)$ es el **coeficiente de extinción**. A la relación $I_{\lambda}/I_{o,\lambda}$ se la denomina *transmitancia*, la cual si toma un valor de 1, significa que no se producen efectos de extinción en el volumen analizado. El super-índice t en $\alpha_{\lambda}^t(r)$ de la expresión 2.4.1 es por *total*, ya que en nuestro caso, la extinción es analizada en un medio heterogéneo, formado por *moléculas* y *partículas*. La componente molecular de este parámetro es conocida, la cual, se obtiene por medio de los datos de un radiosondeo o por medio de modelos atmosféricos (ver sub-sección 2.4.2.1), mientras que la componente aerosólica es la de mayor interés, y es el resultado del lidar Raman multiángulo de este trabajo.

El **coeficiente de extinción** está formado por la suma del **coeficiente de absorción** (σ) y el **coeficiente de dispersión** (β). Esto es (se omite el sub-índice λ por cuestiones de practicidad):

$$\alpha^t(r) = \sigma^t(r) + \beta^t(r) \quad (2.4.2)$$

Un parámetro muy importante en el estudio de la transferencia radiativa en la atmósfera es el denominado **espesor óptico atmosférico**, o según sus siglas en ingles OD (Optical Depth):

$$OD = \int_0^r \alpha^t(r) dr \quad (2.4.3)$$

el cual, el de mayor importancia es el que corresponde a los aerosoles, o también denominados, partículas:

$$AOD = \int_0^r \alpha^p(r) dr \quad (2.4.4)$$

donde por convención, se utilizará su expresión en inglés: **AOD**, las cuales significan Aerosol Optical Depth (Espesor Óptico Atmosférico en español). Este parámetro determina la cantidad de radiación removida a medida que atraviesa el medio en estudio.

Estos parámetros son función de diferentes variables, como la relación entre el diámetro de las moléculas/partículas en estudio y la longitud de onda, su composición química, índice de refracción, etc.

Otro de los parámetros importantes en el estudio de los aerosoles es el **albedo de dispersión simple**. Este parámetro, que es una medida de la radiación dispersada por un medio, está dado por la relación entre la dispersión y la extinción:

$$\omega_0(\lambda) = \frac{\beta(\lambda)}{\alpha(\lambda)} = 1 - \frac{\sigma(\lambda)}{\alpha(\lambda)} \quad (2.4.5)$$

por lo que en un medio puramente dispersor, el albedo toma el valor de 1.

Aplicado este parámetro al estudio de los aerosoles, se puede deducir que un albedo alto enfría el planeta, ya que la radiación es mayormente retrodispersada. Por el contrario, un albedo bajo, significa que la radiación es mayormente absorbida por la atmósfera, ganando energía y por lo tanto, aumentando su temperatura.

Se describen en las siguientes secciones diferentes tipos de interacción radiación-materia que son de interés en la interpretación de la ecuación lidar: absorción, dispersión (Rayleigh y Mie) y dispersión Raman.

2.4.1. Absorción

En este proceso, la energía del fotón incidente pasa a formar parte de la molécula/-partícula con la que interacciona. Este proceso se observa en la atmósfera terrestre en los denominados gases traza. Los principales absorbentes de la radiación solar en la atmósfera son el N_2 , O_2 , O_3 y el vapor de agua. También los denominados el CO_2 , NO_2 , CH_4 , CO_2 , H_2SO_4 , los óxidos de nitrógeno y diferentes combinaciones de hidrocarburos. Los gases atómicos como el Oxígeno (O) y el Nitrógeno (N_2) absorben de forma continua los rayos X y las longitudes de onda corta hasta $0,085 \mu m$. El nitrógeno presenta una fuerte banda de absorción en el ultravioleta, cerca de $0,1 \mu m$, y bandas más débiles entre $0,23$ y $0,34$ (Bandas de Vegard-Kaplan). El oxígeno tiene tres bandas de absorción en el visible a $0,63$, $0,69$ y $0,76 \mu m$. Además de la absorción en el visible, el Oxígeno tiene fuertes bandas de absorción para $\lambda < 0,1 \mu m$ (Banda de Runge), entre $0,12$ y $0,20 \mu m$ (Banda de Schuman) y entre $0,20$ y $0,26 \mu m$ (Banda de Hertzberg). El Ozono (O_3) tiene una banda de absorción fuerte entre $0,21$ y $0,30 \mu m$ (Banda de Hartley), una más débil entre $0,3$ y $0,35 \mu m$ (Banda de Huggins) y otra en la región del visible entre $0,44$ y $0,64 \mu m$ (Banda de Chappuis). También presenta bandas de absorción en el infrarrojo, en $4,8$, $9,6$ y $14,2 \mu m$. La absorción del vapor de agua juega un papel muy importante en la atenuación de la radiación solar en la región del infrarrojo próximo. Presenta tres bandas de absorción intensas en $1,1$, $1,4$ y $1,8 \mu m$, y otras bandas importantes en $0,72$, $0,82$, $0,94$, $2,7$, $3,2$ y $6,3 \mu m$. El dióxido de carbono (CO_2) tiene bandas de absorción importantes en la región infrarroja, en $1,45$, $1,6$, $2,0$, $2,7$, $4,3$, $4,8$ y $5,2 \mu m$. Por encima de $2,3 \mu m$, la energía contenida en el espectro solar es pequeña (menor que 5 %), y la acción combinada de absorción de H_2O y CO_2 hacen que la energía recibida en la superficie para estas longitudes de onda sea muy pequeña [52].

2.4.2. Dispersión elástica

La dispersión elástica es un redireccionamiento de la radiación incidente manteniendo su longitud de onda, siendo su intensidad y dirección dependiente de varios factores, como la relación entre la longitud de onda y el diámetro del elemento dispersor, el índice de refracción y su composición química. El principio de funcionamiento del lidar hace uso de este fenómeno (y de la dispersión Raman, explicada en la sub-sección 2.4.3), logrando captar los fotones retrodispersados con sus telescopios. El estudio teórico de este efecto es derivado como solución a las ecuaciones de Maxwell en coordenadas esféricas polares, considerando a los dispersores como esferas perfectas y conductoras. No es el objetivo de

este capítulo realizar el desarrollo matemático, pero si definir los parámetros necesarios para el entendimiento y categorización de este fenómeno.

Para el estudio de la interacción radiación-materia, es necesario la definición del parámetro **sección eficaz** (**scattering cross section**, según su denominación en inglés), representado por la letra sigma y expresado como:

$$\sigma_{\theta} = \frac{d\sigma_t}{d\theta} \quad (2.4.6)$$

Este parámetro posee unidades de área por unidad de ángulo sólido ($cm^2 sr^{-1}$). Ésta es un área hipotética, la cual describe la probabilidad de dispersión en la dirección θ producida por la molécula o partícula. En general, esta área es diferente al área geométrica del elemento en estudio, siendo dependiente de la longitud de onda, el índice de refracción, y su forma. Si se desea obtener la dispersión total, se procede integrándolo a lo largo de 4π :

$$\sigma_t = \int_{-4\pi}^{4\pi} \sigma_{\theta} d\theta \quad (2.4.7)$$

la cual nos da la energía media dispersada en todas direcciones.

La **función de fase** $P(\theta)$ es un parámetro normalizado y adimensional, definido comúnmente en el campo del sensado remoto como [16]:

$$P(\theta) = \frac{\sigma_{\theta}}{\sigma_t} \quad (2.4.8)$$

el cual, responde a la normalización: $\int_{-4\pi}^{4\pi} P(\theta).d\theta = 1$. Puede encontrarse en otras bibliografías [81][82] que esta normalización obedece a $\int_{-4\pi}^{4\pi} P(\theta).d\theta = 4\pi$, siendo la definición de la función de fase: $P(\theta) = 4\pi \sigma_{\theta}/\sigma_t$. Este cociente representa la dependencia angular de la dispersión, definida como la relación de la energía dispersada por unidad de ángulo sólido en la dirección θ , dividido por la energía total dispersada. En un medio isótropo (igual dispersión en todas direcciones), $P(\theta) = 1$, siendo este parámetro además dependiente de las características de los elementos dispersores, pero no de su cantidad.

Se define entonces al coeficiente de dispersión direccional de un medio, como el producto de la densidad volumétrica de elementos dispersores ($N(r)$, en unidades de cm^{-3}), multiplicado por la sección eficaz direccional:

$$\beta_{\theta}(r) = \sigma_{\theta} N(r) [cm^{-1}.sr^{-1}] \quad (2.4.9)$$

el cual, aplicado al lidar, se necesitará el coeficiente de retrodispersión, que se obtiene aplicando la última ecuación para $\theta = \pi$, por lo que se tendrá:

$$\beta_{\pi}(r) = \sigma_{\pi} N(r) [cm^{-1}.sr^{-1}] \quad (2.4.10)$$

En el estudio de la dispersión aplicada a la atmósfera terrestre, se pueden diferenciar dos clases: la producida por las moléculas de aire (dispersión Rayleigh) y la producida por las partículas (dispersión Mie). Esta clasificación es en base a la manera en que responde la **sección eficaz direccional** (σ_{θ}) en función del tamaño, forma, índice de refracción y longitud de onda incidente, resultando diferentes formas e intensidades en los lóbulos de dispersión resultantes.

Para esta categorización, se define la **relación de tamaño** al parámetro adimensional:

$$x = \frac{2\pi r}{\lambda} \quad (2.4.11)$$

donde:

r : radio medio del elemento dispersor.

λ : longitud de onda de la radiación incidente.

Este parámetro ayuda a definir los límites para los diferentes tipos de dispersión, como se puede observar en la figura 2.4.1. En esta figura, son consideradas solo partículas esféricas y en casos de dispersión simple. Para el caso de partículas, con formas irregulares y dispersión múltiple, el análisis es mucho más complejo.

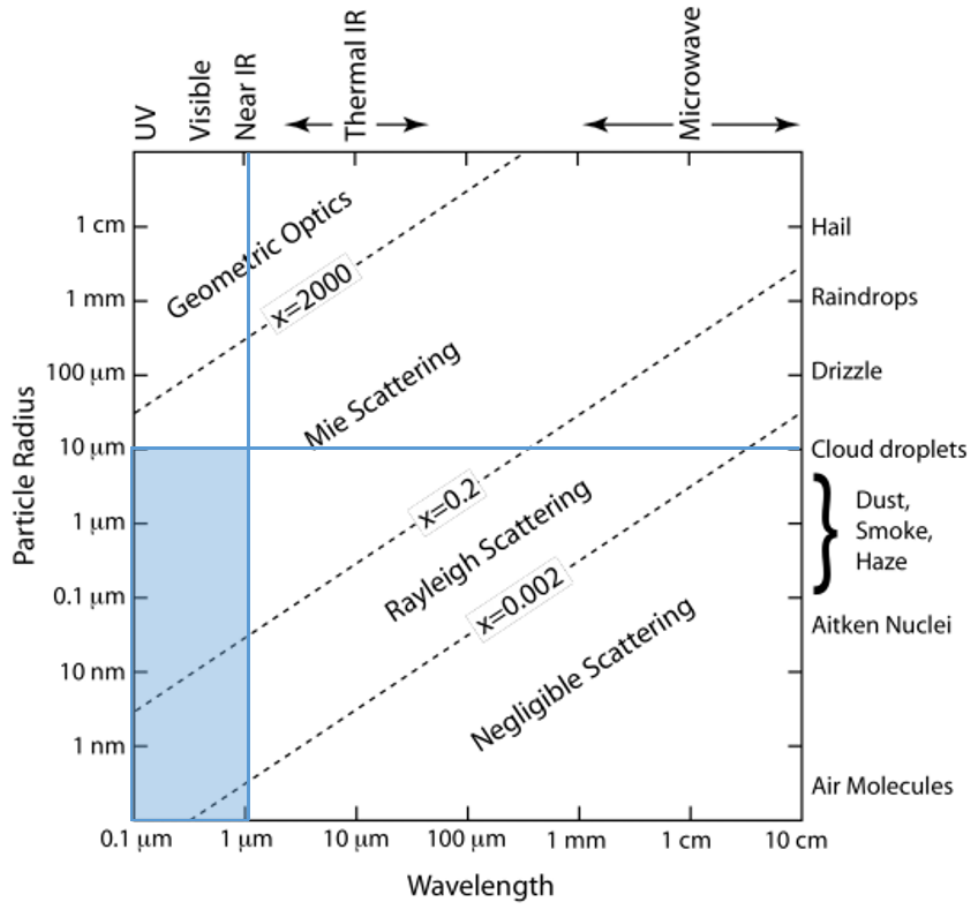


Figura 2.4.1: Diferentes tipos de dispersión en función de la relación de tamaño, longitud de onda y radio de la partícula. Las divisiones planteadas en este gráfico pueden variar según la bibliografía utilizada.[83]

En este último gráfico se puede observar (marcada en color celeste) la zona típica de trabajo del lidar: longitudes de onda del ultra-violeta hasta el infra-rojo cercano y partículas de aerosoles de hasta $10 \mu m$ aproximadamente. Este último límite se puede extender para eventos particulares, como por ejemplo, erupciones volcánicas, las cuales, pueden emitir aerosoles a la atmósfera de dimensiones superior a $10 \mu m$.

A continuación se hará una descripción más detallada de los dos tipos de dispersiones que se dan lugar en la atmósfera terrestre y que son de utilidad para el entendimiento del lidar.

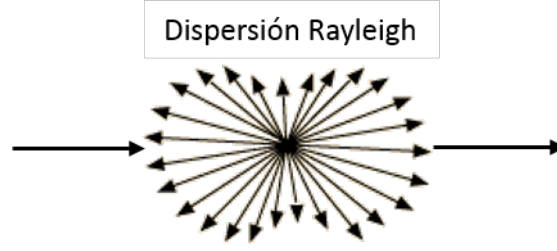


Figura 2.4.2: Representación de la intensidad del ángulo de dispersión Rayleigh. Esta intensidad es máxima en la dirección de incidencia, y mínimo para el caso perpendicular a esta dirección.

2.4.2.1. Dispersión Rayleigh

Esta dispersión se da cuando el diámetro del elemento está muy por debajo de la longitud de onda de la radiación incidente ($x \ll \lambda$). Como se puede ver en la figura 2.4.1, en esta tesis es aplicada a las moléculas de aire, las cuales poseen un diámetro no mayor a 1 nm, y la longitud de onda más corta emitida por el láser es 355 nm. Si se ignoran efectos de despolarización, y ajustes por temperatura y presión, se obtiene la expresión de la sección eficaz para elementos dispersores perfectamente esféricos por medio de la expresión:

$$\sigma_{\theta}^m = \frac{\pi^2 (m^2 - 1)^2}{2 N^2 \lambda^4} (1 + \cos^2 \theta) \quad (2.4.12)$$

donde:

m : es la parte real del índice de refracción.

N : es la densidad volumétrica de las moléculas.

λ : longitud de onda en estudio.

Para estos casos, la **sección eficaz** es fuertemente dependiente de la longitud de onda ($\sim \lambda^{-4}$), siendo más relevante para zonas del ultra-violeta, y prácticamente despreciable en el infrarrojo. Su ángulo de dispersión es simétrico respecto a la dirección perpendicular de propagación, como se puede observar cualitativamente en la figura 2.4.2.

Para el sistema lidar, nos interesa la sección eficaz de retrodispersión ($\theta = \pi$), por lo que la ecuación 2.4.12 queda:

$$\sigma_{\pi}^m = \frac{\pi^2 (m^2 - 1)^2}{N^2 \lambda^4} \quad (2.4.13)$$

Evaluando este parámetro a nivel del mar, y hasta los 100 km, se puede aproximar como [84]:

$$\sigma_{\pi}^m = 5,45 \left(\frac{550}{\lambda[nm]} \right)^4 10^{-28} \frac{cm^2}{sr} \quad (2.4.14)$$

Para obtener la sección eficaz total, se parte de la expresión 2.4.12 y se integra a lo largo de toda la esfera que conforma un ángulo sólido, obteniendo:

$$\sigma_t^m = \frac{8\pi^3 (m^2 - 1)^2}{3 N^2 \lambda^4} \quad (2.4.15)$$

Al momento de la inversión de la señal lidar (a desarrollarse en el capítulo 8), es necesario conocer las componentes moleculares de $\alpha^m(r)$ y $\beta^m(r)$. La sección eficaz de las

moléculas de aire esta bien definido, por lo que solo resta calcular la concentración del mismo ($N^m(r)$). Este parámetros pueden ser obtenidos con datos reales de radiosondeos cercanos, o con la ayuda de la base de datos de una atmósfera estándar (como por ejemplo la U.S. Standard Atmosphere, 1976 [85]). Con esta información (presión y temperatura en función de la altura), junto con la ecuación de los gases ideales, podemos obtener la densidad de moléculas $N^m(r)$ de la siguiente manera:

$$N^m(r) = \frac{P(r)}{T(r)} \frac{N_a}{R_a} \quad (2.4.16)$$

donde:

$P(r)$: Presión en función de la altura r .

$T(r)$: Temperatura en función de la altura r .

N_a : Número de Avogadro.

R_a : Constante de gas para aire seco.

Luego, aplicando los resultados de 2.4.16 y 2.4.14 a la ecuación 2.4.9, obtenemos la retrodispersión molecular que necesitamos para la inversión de la señal lidar:

$$\beta_\pi^m(r) = \sigma_\pi^m(r) N^m(r) \quad (2.4.17)$$

Finalmente, para la obtención del coeficiente de extinción molecular $\alpha^m(r)$, se hace uso de la función de fase. Reemplazando las expresiones 2.4.12 y 2.4.15 en dicha función (ecuación 2.4.8) se obtiene:

$$P(\theta) = \frac{\sigma_\theta^m}{\sigma_t^m} = \frac{3}{16\pi} (1 + \cos^2\theta) \quad (2.4.18)$$

Considerando a las moléculas como dispersores puros, descartando los efectos de absorción de las mismas, se tiene:

$$\alpha^m(r) = \beta^m(r) = N^m(r) \sigma_t^m \quad (2.4.19)$$

$$\sigma_t^m(r) = \frac{\alpha^m(r)}{N^m(r)} \quad (2.4.20)$$

Bajo esta consideración, y reemplazando 2.4.20 en 2.4.18, se tiene:

$$P(\theta) = \frac{N^m(r) \sigma_\theta^m(r)}{\alpha_t^m(r)} = \frac{\beta_\theta^m(r)}{\alpha_t^m(r)} = \frac{3}{16\pi} (1 + \cos^2\theta) \quad (2.4.21)$$

aplicando para el caso particular de $\theta = \pi$, necesario para la implementación en el lidar:

$$P(\pi) = \frac{\beta_\pi^m(r)}{\alpha_t^m(r)} = \frac{3}{8\pi} \quad (2.4.22)$$

Este valor de $3/8\pi$, será de gran utilidad en la inversión de las señales lidar elásticas, a desarrollarse en el capítulo 8. Como puede notarse, esta relación es constante para todo el rango. Esto no se produce para las partículas de aerosoles, haciendo su desarrollo teórico mucho más complejo. Este tipo de dispersión Mie se abordará en la siguiente sección.

2.4.2.2. Dispersión Mie

Este tipo de dispersión es aplicada en esta tesis a las partículas aerosólicas, las cuales, poseen dimensiones comparables con la longitud de onda de emisión del láser ($x \sim 1$). Este tipo de dispersión es comúnmente llamada “Dispersión Mie” [86], en honor a quien fue el primero en desarrollar una explicación teórica de este fenómeno.

De la misma manera que en la dispersión Rayleigh, la sección eficaz es también dependiente de la forma de la partícula, su índice de refracción, y la densidad con la que se encuentra en el medio. Debido a que la radiación electromagnética envuelve a la partícula en su superficie, y siendo el perímetro de una dimensión comparable a λ , esto provocará interacciones constructivas y destructivas, generando por lo tanto, patrones de dispersión menos simétricos que en el caso de dispersión Rayleigh. El análisis teórico de esta dispersión se realiza para partículas perfectamente esféricas y conductoras, simplificación que no se cumple completamente en la realidad. Existen estudios en donde consideran a las partículas como pequeñas varillas y hexágonos [87][88][89][90], pero su implementación práctica es muy compleja. Otras consideraciones tenidas en cuenta en este análisis teórico es que la radiación incidente es monocromática (aproximación válida para el caso del lidar, debido a lo angosto de las líneas de emisión láser) y que la dispersión es simple, considerando despreciables las dispersiones de mayor orden. El desarrollo teórico excede el objetivo de este capítulo, y puede ser realizado para un número limitado tamaños y formas de partículas. Sin embargo, dicho estudio puede ser encarado por medio de software especializado, el cual, calculan la sección eficaz utilizando aproximaciones a las funciones complejas de la teoría de Mie [16].

Se describirán aquí los conceptos y parámetros principales para el estudio y caracterización de este tipo de interacción. Para esto, es necesario el uso de dos parámetros adimensionales: la relación de tamaño x (presentada en la sección 2.4.2), y la **eficiencia de dispersión**, definido como:

$$Q_d = \frac{\sigma_t^p}{\pi r^2} \quad (2.4.23)$$

donde r es el radio medio de la partícula en estudio, y el super-índice p es por *partícula*.

Como se observa, este factor relaciona la sección eficaz total con la sección geométrica del elemento dispersor. Para obtener la expresión del **coeficiente de dispersión** β_t^p para partículas, se procede a reemplazar las expresiones 2.4.23 y 2.4.11 en la expresión de β de la ecuación 2.4.9, por lo que se obtiene:

$$\beta_t^p = N_p \pi r^2 Q_d \quad (2.4.24)$$

Una vez definidos estos parámetros, se puede analizar la dependencia de la eficiencia de dispersión Q_d en función del radio de la partícula r . En la figura 2.4.3, se puede observar a Q_d en función del radio de la partícula, para las 3 longitudes de onda utilizadas en el lidar, y para un índice de refracción de 1,5, correspondientes a aerosoles formados por núcleos de condensación con una pequeña cantidad de agua.

En la figura 2.4.3, puede observarse que el máximo de la eficiencia de extinción se da cuando el radio de la partícula es similar a la longitud de onda analizada, siendo la posición de este máximo dependiente del índice de refracción. Se puede observar también que, para radios superiores a $10 \mu m$ (aproximadamente), la sección eficaz tiende a valores cercanos a 2.

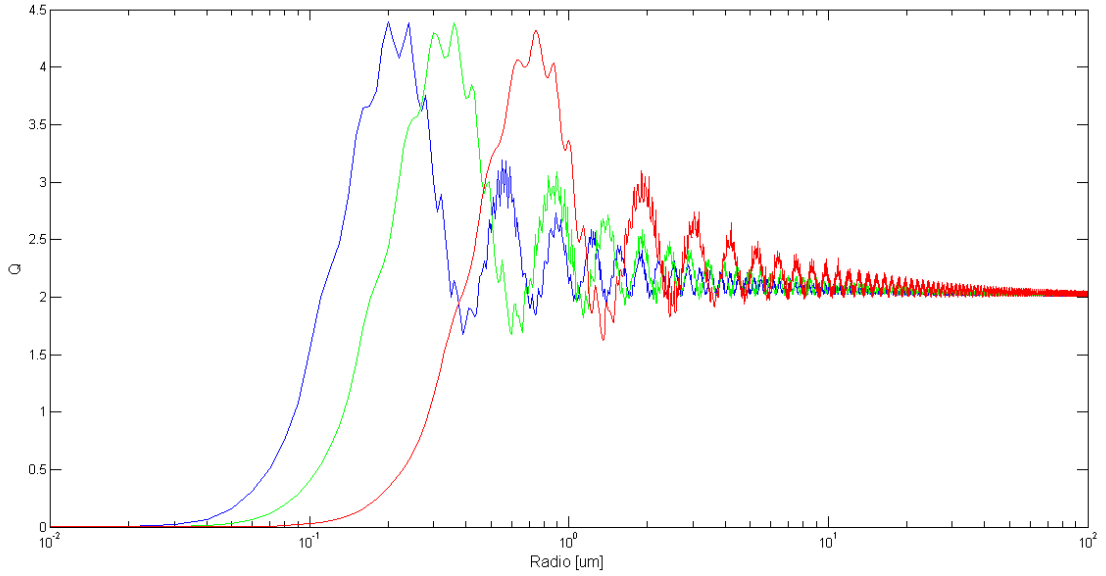


Figura 2.4.3: Gráficos de la eficiencia de dispersión en función del radio de la partícula, para las 3 longitudes de onda emitidas por el láser. Este análisis fue realizado con el software MiePlot [91].

En cuanto a la intensidad de dispersión en función del ángulo, se logran mayores intensidades en sentido de la onda incidente, como se puede observar cualitativamente en la figura 2.4.4.

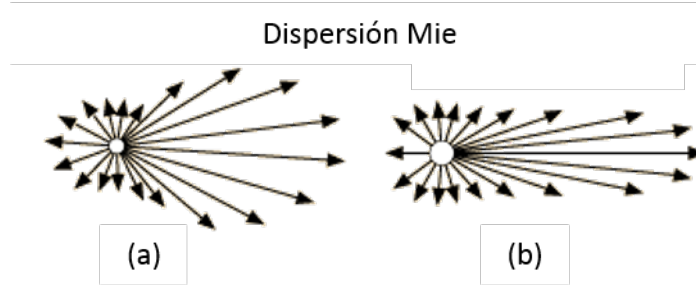


Figura 2.4.4: Representación cualitativa de la intensidad del ángulo de dispersión Mie para dos casos, donde la partícula del caso (a) es menor a λ y la del caso (b) es mayor, produciendo en este segundo caso un lóbulo frontal más pronunciado.

En la figura 2.4.4 se observa que a medida que aumenta el radio medio teórico de la partícula a estudiar con respecto a λ , la retrodispersión disminuye y aumenta la dispersión en sentido de la onda incidente.

Los parámetros de $\alpha^p(r)$ y $\beta^p(r)$ de las partículas son los resultados que entrega el lidar Raman multiángulo de este trabajo, ya que por el desconocimiento del tipo de aerosoles (y la mezcla) que se encuentran al momento de la medición, resultan muy difícil expresarlo analíticamente.

Estos resultados pueden ser obtenidos por el lidar con sus señales elásticas, pero para esta inversión se necesita tomar ciertas consideraciones *a-priori*, las cuales llevan a cometer errores sistemáticos de hasta un 20 %. Para reducir esta incerteza, se opta por detectar en el lidar las líneas de retrodispersión Raman, reduciendo la incerteza en la inversión a un 5 %. Este tipo de dispersión, también denominada ‘inelástica’, se describirá en la siguiente

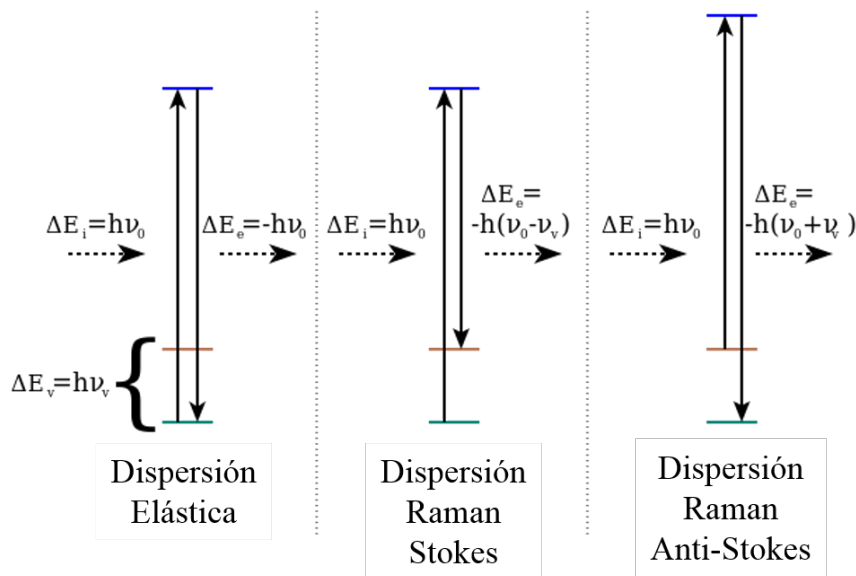


Figura 2.4.5: Diferentes tipos de dispersión: elástica y rotacional Stokes y anti-Stokes.

sección.

2.4.3. Dispersión Raman

Se puede decir que este tipo de dispersión es un efecto combinado de los dos anteriores, ya que la molécula absorbe un fotón para luego emitirlo a una longitud de onda diferente. El tiempo de esta interacción es casi instantáneo, siendo inferior a 10^{-14} s.

Debido a que la radiación dispersada posee una longitud de onda diferente a la incidente, se lo suele denominar también “dispersión inelástica”. Esta dispersión se produce debido a que la molécula sufre un cambio de estado cuántico (rotacional y/o vibracional), el cual genera el desplazamiento de frecuencia, dependiente tanto de la longitud de onda incidente como de la molécula dispersora.

Existen dos tipos de dispersión Raman rotacional: Stokes y Anti-Stokes, siendo la primera de mayor peso en la atmósfera terrestre. En la dispersión Raman Stokes, el fotón reemitido posee una energía menor que la del fotón incidente, resultando la radiación dispersada de una longitud de onda mayor. Para el caso de dispersión Raman Anti-Stokes, el efecto es contrario, reemitiendo un fotón de mayor energía con un desplazamiento en frecuencia hacia el ultra-violeta. Estos efectos se puede observar esquemáticamente en la figura 2.4.5.

Este tipo de dispersión inelástica tiene una eficiencia muy baja debido a las bajas secciones eficaces, del orden de $10^{-32} - 10^{-28} \text{ cm}^2/\text{molécula}$. Para una detección más eficientes de estas líneas con el lidar, se trabaja con longitudes de onda ultravioleta, ya que la sección eficaz es función de λ^{-4} (ver ecuación 2.4.13). También, para lograr coeficientes de retrodispersión más altos, se utilizan las retrodispersiones de los componentes atmosféricos de mayor concentración: nitrógeno (N_2), oxígeno (O_2) y vapor de agua (H_2O), cuyas densidades atmosféricas se obtienen a partir de los perfiles de presión y temperatura.

En la figura 2.4.6, se pueden observar las líneas rotacionales Stokes y anti-Stokes, centradas en la líneas elástica de 355 nm, y en las líneas vibracionales para el N_2 , O_2 y H_2O .

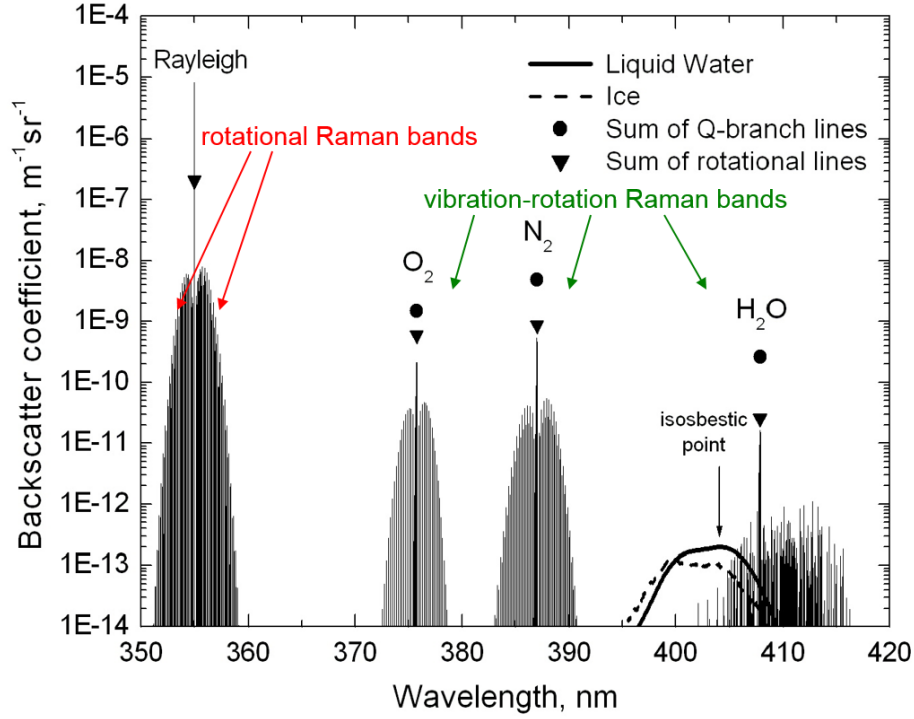


Figura 2.4.6: Espectro del coeficiente de retrodispersi3n Raman ($\beta_{\pi}^{N_2}$) que se obtiene al excitar a mol3culas de N_2 , O_2 y H_2O con una radiaci3n de longitud de onda de 355 nm. Se observan los l3bulos rotacionales centrados en la longitud de onda el3stica y sus correspondientes longitudes de onda vibracionales.[17]

En el lidar desarrollado en esta tesis se detectar3n las l3neas Raman del n3tr3geno para 355 y 532 nm, las cuales son 387 y 607 nm respectivamente. Tambi3n, se implement3 la detecci3n Raman del vapor de agua para una excitaci3n con 355 nm, la cual es 408 nm. La detecci3n de estas l3neas en un lidar soluciona muchos de los problemas que se poseen en la inversi3n de la se3al el3stica. Este punto se desarrollar3 detenidamente en el cap3tulo 8.

2.5. Conclusiones

En este cap3tulo se ha realizado una descripci3n del medio a caracterizar con el lidar Raman multi3ngulo de este trabajo: los aerosoles atmosf3ricos. Dicha descripci3n fue realizada desde el punto de vista de sus par3metros 3pticos, haciendo principal 3nfasis en los conceptos a desarrollar en el momento de la inversi3n de sus datos. Esto ser3 tratado en el cap3tulo 8, dedicado al procesamiento de las se3ales adquiridas.

Capítulo 3

Diseño Conceptual del Lidar Raman Multiángulo

3.1. Introducción

En este capítulo se enuncian las especificaciones que debe cumplir el *hardware* del lidar, las cuales, sirven de punto de partida para su diseño. El proceso de simulación es muy importante para preveer los niveles de señal a obtener, como también, la caracterización de la relación señal/ruido (S/N) [92].

El principal objetivo de esta simulación consiste en **obtener el área total de recepción y el tiempo mínimo de adquisición para lograr una buena relación S/R en toda la tropósfera con la señal Raman de 387 nm**. Esto permite asegurar la calidad del resto de las señales medidas en cada adquisición. En caso de requerir una mayor relación S/R, se podrá promediar un conjunto de señales adquiridas, logrando un primer control del ruido aleatorio por medio de filtrado temporal. Estas promediaciones temporales podrán llevarse a cabo con señales adquiridas bajo las mismas coordenadas acimutales-cenitales.

De la misma manera que se reportó en [93], se desarrollarán los pasos para la simulación del lidar desarrollado en este trabajo. Luego del planteo de las especificaciones generales, se continuará con las especificaciones particulares de cada componente. Se justificarán las decisiones tomadas para la selección de los mismos, cuyas características permiten la modelización del *hardware* necesario para la simulación. El modelo atmosférico a utilizar es definido bajo condiciones extremas de espesor óptico aerosólico para la atmósfera de los Observatorios. Finalmente con las condiciones de *hardware* y atmósfera planteadas, se realizaron las simulaciones de las señales lidar (elástica y Raman), y su relación S/R. Los resultados permiten cuantificar el alcance y calidad del sistema, pudiendo así seleccionar el área de colección y tiempo de promediación óptimo, a fin de satisfacer las especificaciones señaladas.

3.2. Especificaciones generales del lidar multiángulo

Se realizó un diseño basado en los puntos 1 al 5 de las especificaciones enunciadas en el capítulo 1 sección 1.4. Allí, se resumieron las características generales que debe cumplir el lidar, las cuales sirven de guía para definir los componentes principales en la modelización del *hardware*.

3.3. Especificaciones de la óptica de recepción, láser y electrónica de adquisición. Criterios de selección

Se definirá a continuación las especificaciones y características que deben cumplir los principales elementos del lidar en cuanto a la emisión y recepción. La elección de estos componentes definirán una primera etapa de variables necesarias para la modelización del *hardware*.

3.3.1. Óptica de recepción

La óptica de recepción está formada por los telescopios, las fibras ópticas, y la caja espectrométrica. En esta sección, se describen las características principales de cada uno

de estos elementos basados en las especificaciones generales de los mismos. Se definirán también los motivos de selección.

3.3.1.1. Telescopios

Debido a la característica multiángulo del sistema, resulta imprescindible tener gran estabilidad mecánica entre el láser y los telescopios de recepción, ya que de no ser así, se vería afectada negativamente la calidad de la señal adquirida. Esto nos lleva a la necesidad de utilizar un sistema robusto, con un diseño sencillo y liviano, para evitar posibles desalineaciones. Es por esto que se decidió utilizar telescopios de tipo Newtonianos, ya que poseen: 1) mínima cantidad de elementos ópticos, 2) simplicidad en la construcción y 3) el procedimiento de alineación es simple.

La División Lidar ha trabajado desde sus inicios con telescopios de este tipo, los cuales son producidos en el país, proporcionando una gran área de colección: 40 *cm* de diámetro y una distancia focal de 1 metro. Los telescopios que posee la División Lidar en sus equipos de medición vertical son fabricados pegando 3 obleas de vidrio de 1,5 *cm* de espesor cada una, logrando de esta manera mayor rigidez y evitando deformaciones. El problema que trae aparejado esto es su considerable peso, que supera los 3 *kg* por telescopio, sin contar su propio sistema de sujeción. Para este lidar, se han probado y obtenidos excelentes resultados con telescopios de las mismas características (40 *cm* de diámetro y 1 *m* de distancia focal), pero pulidos sobre una sola oblea, para reducir su peso considerablemente, característica más que necesaria a la hora de moverlo en el proceso de escaneo. Finalmente, el aluminizado fue realizado en el departamento de microelectrónica de CITEDEF, logrando telescopios a buen precio y descartando la opción de tener que comprarlos en el exterior del país. En la figura 3.3.1, se observa una foto del espejo pulido sin aluminizar:

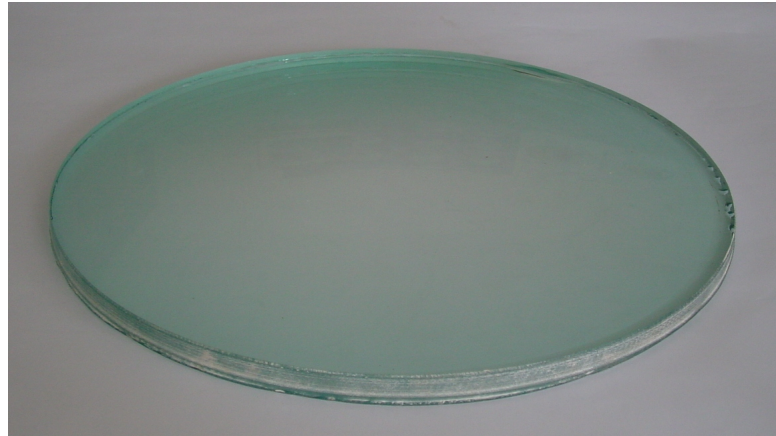


Figura 3.3.1: Oblea de vidrio pulida parabólicamente sin aluminizar, correspondientes a uno de los telescopios del lidar.

En el foco de cada telescopio se coloca una fibra óptica para conducir los fotones colectados hacia la caja espectrométrica. Esta fibra óptica tiene 1 *mm* de diámetro, dando al telescopio un campo de visión (FOV, según sus siglas en inglés) de 1 *mrad*. Su apertura numérica es de 0,22, la cual, permite cubrir sin problemas toda el área de colección.

La cantidad total de telescopios necesarios para el sistema es uno de los objetivos principales de la simulación, que se desarrolla en la sección 3.4.

3.3.1.2. Caja espectrométrica

La caja espectrométrica de este sistema debe ser capaz de filtrar y detectar las longitudes de onda elásticas y Raman. Las longitudes de onda elásticas son aquellas las emitidas por el láser: 355, 532 y 1064 nm, mientras que las Raman corresponden a 387 y 607 nm (provenientes del N_2 para 355 y 532 nm respectivamente), y la retrodispersión del vapor de agua proveniente de 355 nm, que se encuentra en 408 nm.

Para este dispositivo óptico se utilizó el mismo diseño empleado por la División Lidar en sus equipos [21]. El diagrama esquemático de la caja espectrométrica se muestra en la siguiente figura:

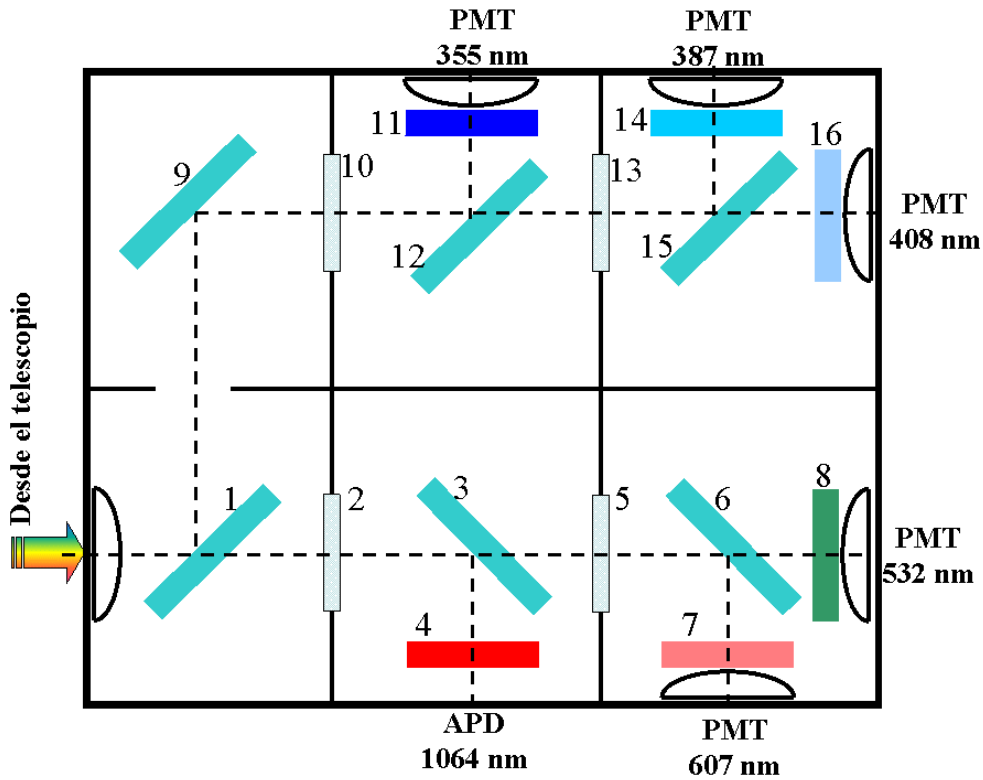


Figura 3.3.2: Caja espectrométrica de 6 longitudes de onda adoptado para el lidar Raman multiángulo.[21]

Las especificaciones técnicas de cada uno de sus componentes se indican en las siguientes tablas [21]:

Espejos Dicroicos		
Número	Reflectividad [%]	Transmición [%]
1	85 @ 355-408 nm	85 @ 532-1064 nm
3	90 @ 1064 nm	85 @ 532-607 nm
6	80 @ 607 nm	75 @ 532 nm
12	70 @ 355 nm	65 @ 387-408 nm
15	70 @ 387 nm	60 @ 408 nm
UV Cold Mirror		
9	90 @ 375-475 nm	85 @ 600-1200 nm

Cuadro 3.3.1: Características de los espejos dicroicos de la caja espectrométrica.

Filtros pasa banda			
Número	Long. de onda [nm]	Transmisión Máxima [%]	Ancho de Banda [nm]
4	1064	40	1
7	607	40	1
8	532	40	1
11	355	20	1
14	387	10	1
16	408	10	1

Cuadro 3.3.2: Características de los filtros pasa banda de la caja espectrométrica.

Para la detección en el infrarrojo se utiliza un fotodiodo de avalancha de la empresa Licel [94], y para el resto de las líneas se utilizan fotomultiplicadores modelo H6780 de la empresa Hamamatsu [25][24].

3.3.2. Láser

El tipo de láser comúnmente utilizado para medir aerosoles son los de Nd:YAG (acrónimo del inglés Neodymium Yttrium Aluminium Garnet). Este tipo de láser emite una longitud de onda fundamental de 1064 nm, de la cual, por medio de un proceso óptico no lineal, se obtienen los armónicos restantes: 355 y 532 nm.

Debido a la capacidad multiángulo del lidar, es necesario que el láser apunte a diferentes direcciones, definidas por diferentes ángulos acimutales y cenitales, acompañando solidariamente el movimiento de los telescopios. Esto implica la necesidad de un láser robusto, preparado para ambientes industriales, y que sea capaz de emitir en diferentes posiciones. También, se deberá tener en cuenta características tales como la divergencia del haz, su duración y la energía del pulso. Se lista a continuación una tabla con las características cuatro láseres de dos empresas líder:

Parámetro	Long. de onda [nm]	Láser			
		Inlite II-50	Quantel Centurion	Quantel Ultra GRM	Quantel CFR 400
Energía [mJ]	355	20	6	6	80
	532	60	18	30	190
	1064	125	40	50	330
Divergencia [mrad]	355	<0,75	<4	<1	<4
	532	<0,75	<5,5	<1	<4,5
	1064	<0,75	<7	<1,5	<5
Frec.[Hz]		50	1-100	20	30
Pulso[ns]	355	5-7	7	<6	7
	532	5-7	7	<7	7
	1064	6-8	8	<8	8
Diámetro inicial [mm]	355	6	1,6	3	<7
	532	6	2,2	3	<7
	1064	6	2,6	3	<7

Cuadro 3.3.5: Cuadro comparativo de las características de 4 láseres considerados para el lidar de este trabajo.

El parámetro más estricto en la elección del láser es la divergencia, debido a que si ésta supera el FOV del telescopio, se producirá una pérdida de los fotones emitidos, produciéndose la consecuente pérdida de señal detectada.

En cuanto a la energía por pulso y la frecuencia de repetición, se puede decir cualitativamente que, al aumentar estos parámetros, aumentarán los niveles de la señal lidar. Si bien esto es cierto, hay que tomar varios recaudos, ya que el lidar estará disparando su radiación en cercanía de telescopios ópticos de gran sensibilidad, y por ende, interfiriendo en su medición. Esto se debe a que el rango espectral de los telescopios se encuentra entre 300 y 450 nm [95], de modo tal que puede detectar la señal de 355 nm disparada por el láser del lidar. Este problema ha generado grandes discusiones en la Colaboración Auger, y se ha intentado definir un umbral mínimo de energía de disparo en sus lidares, pero todavía no existe acuerdo definitivo en la Colaboración. Por lo tanto se ha optado por la opción de la empresa Continuum, Inlite II-50, ya que además es una marca de láser con la que la División Lidar ha trabajado en toda su historia.

3.3.3. Electrónica de adquisición. Resolución espacial y tiempo de promediación

En cuanto a los requerimientos impuestos a la electrónica de adquisición, se optó en definir una resolución espacial típica para este tipo de mediciones de 7,5 m. Esta resolución es suficiente para conocer los procesos atmosféricos que se desean medir, siendo el valor más utilizado en los lidares de aerosoles, que puede variar entre 3 y 15 m. Para la resolución seleccionada se deberá adquirir a una frecuencia de muestreo de 20 MHz.

En cuanto al tiempo de promediación (o la cantidad de perfiles a promediar), este se obtiene en base a la relación S/R de la línea Raman de nitrógeno proveniente de 355 nm, la cual es 387 nm. Esta retrodispersión Raman es la segunda más débil de todas, siendo

la línea de vapor de agua aun más inferior. El motivo de la selección de esta línea es para asegurar una mejor relación S/R en las líneas elásticas, y por lo tanto, una buena calidad de señal al momento de realizar la inversión de la señal lidar.

3.4. Simulaciones del lidar multiángulo

En esta sección, se procederá a describir el modelo de *hardware* y de la atmósfera necesarios para realizar las simulaciones. Esto permitirá simular las señales lidar esperadas, como también para estimar la relación S/R. La obtención de este parámetro en función del rango se utilizará para conocer el alcance y calidad de la señal necesaria, como así también, para dimensionar la cantidad de telescopios y el tiempo de promediación necesario para el alcance requerido en este sistema.

3.4.1. Modelo de hardware utilizado

La modelización del *hardware* está directamente relacionada con la elección del láser, la óptica de recepción, y la electrónica seleccionada en las secciones anteriores. Estas elecciones se realizaron en base a un análisis de las necesidades de cada componente, las opciones disponibles en el mercado, y la experiencia de la División Lidar en el uso de estos elementos. En base a los parámetros dados por sus respectivas hojas de datos, se lista a modo de resumen la información utilizada para la modelización del *hardware* del sistema:

	Parámetro		Valor
Emisión	Long. de onda [<i>nm</i>]		355, 532
	Energía por pulso (355, 532 <i>nm</i>) [<i>mJ</i>]		20, 60
	Frecuencia de emisión [<i>Hz</i>]		50
	Eficiencia de toda la óptica de transmisión		0,8
Detección	Diámetro de 1 telescopio [<i>cm</i>]		40
	f# del telescopio		2,5
	Eficiencia de la óptica de recepción		0,2
	Señal de fondo [μV]	355 <i>nm</i>	5
		532 <i>nm</i>	
	Resolución espacial de la señal analógica [<i>m</i>]		7,5
	Máxima frecuencia de conteo (señal Raman) [<i>MHz</i>]		250

Cuadro 3.4.1: Resumen de las variables del *hardware* utilizadas para la simulación del sistema lidar.

3.4.2. Modelo atmosférico utilizado en la simulación

A continuación se detallan las características del modelo atmosférico utilizado en la simulación y la modelización de las señales lidares.

3.4.2.1. Modelo de distribución vertical de moléculas y aerosoles

Se utilizará como modelo molecular atmosférico el correspondiente al de la US Standard Atmosphere [85], por ser ampliamente utilizado en simulaciones de este tipo, como

así también, en la inversión de señales lidar en casos en los que no se posean perfiles atmosféricos de radiosondeos cercanos.

Los parámetros de las propiedades ópticas de los aerosoles fueron modeladas utilizando datos de la clasificación de aerosoles descrita en el capítulo 2, sub-sección 2.3.2.3, tomando valores para aerosoles desérticos, los cuales son los que mejor describen las zonas donde se instalará el lidar de este trabajo. Los valores de la relación LR (Lidar Ratio, según sus siglas en inglés) fueron obtenidos de [96], utilizando valores correspondientes al mismo tipo de aerosol. En cuanto a la modelización de su distribución espacial, fueron modelados confinándolos en la capa límite atmosférica, con un valor de AOD extremo para el sitio donde se instalará el lidar. En la siguiente tabla se resumen los valores utilizados:

Parámetro	Valor
AOD @ 355	0,2
AOD @ 532	0,14
Coefficiente de Ångström	0,75
Altura de la capa límite atmosférica	1500 <i>m</i>
LR @ 355	45 <i>sr</i>
LR @ 532	21 <i>sr</i>

Cuadro 3.4.2: Parámetros atmosféricos utilizados en la simulación de la señal lidar. Los AOD son extremos para los sitios correspondientes a los dos Observatorios (Auger y CTA), mientras que los LR y α son típicos para aerosoles desérticos.

Estos valores fueron seleccionados en base a un escenario atmosférico extremo, ya que al utilizar un valor de AOD mayor al esperado [48], se tiene mayor atenuación del pulso láser, reduciendo los niveles de señal lidar correspondiente a mayores altitudes y por lo tanto, su alcance. El máximo valor de este parámetro utilizado para la selección de los sitios de los Observatorios es de 0,1 para 355 *nm*. Por lo tanto, como se observa en la última tabla, se utilizan en las simulaciones valores que corresponden al doble del máximo valor esperado. La ventaja de buscar la cantidad de telescopios necesarios bajo estas condiciones permite asegurar mejor nivel de señal en situaciones normales de carga aerosólicas (correspondientes a $0,04 < \text{AOD} < 0,05$ según [48]).

3.4.3. Simulación de la relación señal/ruido (S/N)

El objetivo de esta simulación consiste en obtener la cantidad de telescopios y el tiempo de adquisición necesario que posibilita una señal óptima a lo largo de toda la tropósfera. Esta condición será impuesta a la señal Raman de nitrógeno de 355 *nm* (387 *nm*), la cual como ya fué mencionado, es la que posee menor intensidad después de la de vapor de agua. Esta condición brinda un marco de seguridad, ya que se plantea el escenario menos favorable.

La caracterización del ruido en la señal lidar se centrará en el fotomultiplicador, donde como en todo elemento electro-óptico, la emisión de foto-electrones en el fotocátodo está dada por una distribución Poissoniana. Este tipo de ruido es comúnmente denominado “*shot-noise*”, y da lugar al *error aleatorio* en la señal lidar. Este error, junto con el *error sistemático* (propio del método de inversión), son las fuentes principales de incerteza del sistema. El análisis de los errores, y su propagación en los resultados serán tratados en el capítulo 8, y en esta sección, se analizará el ruido de detección, ya que este depende del *hardware* desarrollado.

Basados en las notas técnicas de los fotomultiplicadores [25] [24], se puede expresar la relación S/R en el fotomultiplicador para un lidar con un sólo telescopio como:

$$S/R = \frac{N_{phot}(r)}{\sqrt{\frac{N_{phot}(r) + N_{photBkg}(r)}{Acc}}} \quad (3.4.1)$$

donde:

$N_{phot}(r)$: valor medio de fotoelectrones generados por el fotocátodo **debidos al *backscattering* de la atmósfera** (sin ruido), para un sólo telescopio y un sólo disparo del láser.

$N_{photBkg}(r)$: cantidad de fotoelectrones de *background* generados por el fotocátodo del fotomultiplicador, para un sólo telescopio. Para este análisis, se contempla en este factor la componente de radiación de fondo de la atmósfera, sumada a la componente térmica del fotomultiplicador (en la mayoría de los casos, este último factor puede considerarse despreciable frente al primero).

Acc : cantidad de perfiles acumulados.

En la expresión 3.4.1 se observa que la caracterización del ruido viene dada mediante la desviación estándar. Este parámetro, por tratarse de una distribución Poissoniana, está dado por la raíz cuadrada de la media de fotones generados por el fotocátodo del fotomultiplicador.

Introduciendo la cantidad de telescopios ($numTel$) en la expresión 3.4.1, resulta:

$$S/R = \frac{numTel * N_{phot}(r)}{\sqrt{numTel * \left(\frac{N_{phot}(r) + N_{photBkg}(r)}{Acc} \right)}} = \frac{\sqrt{numTel} * N_{phot}(r)}{\sqrt{\frac{N_{phot}(r) + N_{photBkg}(r)}{Acc}}} \quad (3.4.2)$$

y despejando $numTel$ para S/R=1:

$$numTel = \frac{N_{phot}(r) + N_{photBkg}(r)}{Acc * N_{phot}^2(r)} \quad (3.4.3)$$

Con esta ecuación se obtiene el número de telescopios ($numTel$) para diferentes tiempos de adquisición (o cantidad de perfiles acumulados, Acc) bajo la condición S/R=1 a un determinada rango r . Este valor de S/R es el límite de detección impuesto en este trabajo, para garantizar señales cuya relación S/R>1.

Se muestran en la figura 3.4.1 el número de telescopios para la señal lidar Raman de 387 nm con diferentes valores de Acc .

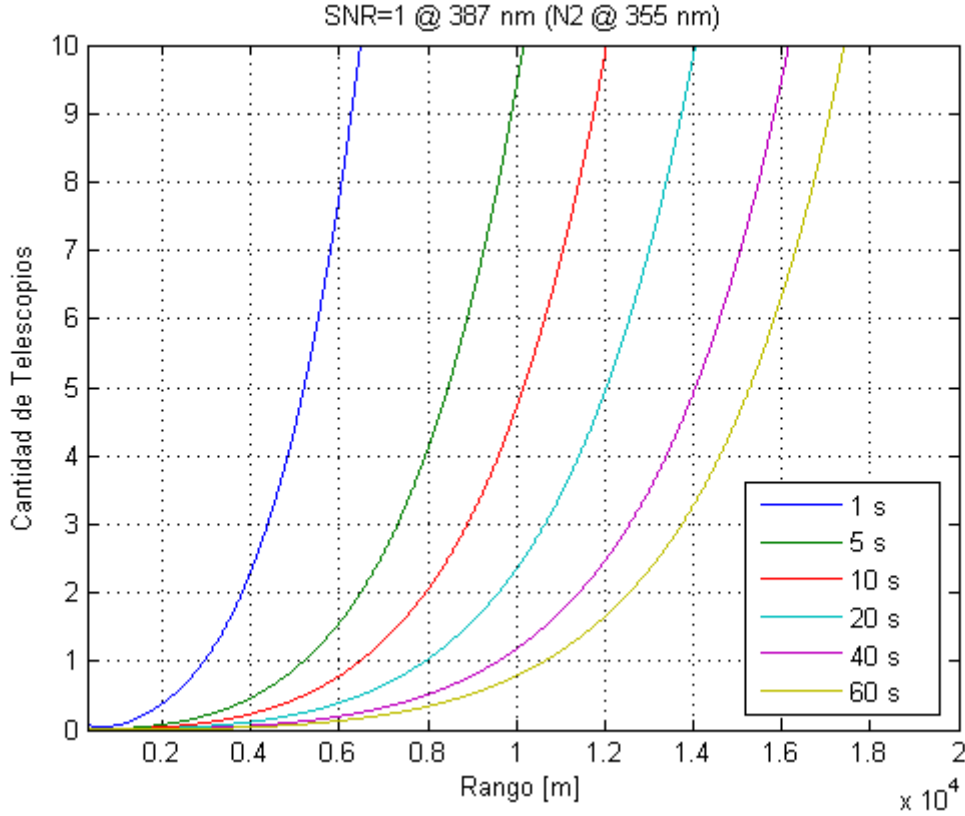


Figura 3.4.1: Cantidad de telescopios en función del rango y la cantidad de perfiles acumulados (o tiempo de adquisición). Cada línea satisface la condición $S/R=1$.

De la figura 3.4.1 se obtiene que para 10 segundos de adquisición ($Acc = 500$, línea roja) y 6 telescopios, la relación $S/R=1$ a una altura **superior** a los 10 km. Además, garantiza mejores valores de S/R para las líneas elásticas, como también, bajo mejores condiciones aerosólicas ($AOD < 0,2$ @ 355 nm y $AOD < 0,14$ @ 532 nm), condición más que esperable para los sitios propuestos para los Observatorios PAO y CTA. En los casos donde la atenuación exceda estos valores, no se cumplirá la condición $S/R \gtrsim 10$ km, por lo tanto, en este caso se deberá aumentar el tiempo de adquisición. Bajo estas condiciones, se definen los siguientes parámetros de diseño y adquisición:

- Cantidad de telescopios: 6.
- Tiempo de adquisición: 10 s.

ya que nos aseguran resultados satisfactorios para las condiciones impuestas. Es necesario remarcar que el tiempo de adquisición obtenido en este análisis es un límite mínimo, el cual caracteriza la capacidad del sistema para relevar señales con buena relación S/R con un bajo tiempo de adquisición. El hecho de poseer perfiles con alta resolución temporal permite que, bajo condiciones particulares, o bajo algún requerimiento especial, se puedan acumular más de un perfil para aumentar su relación S/R . Esto puede llevarse a cabo principalmente en las señales Raman, adquiridas a un ángulo cenital alto y con necesidades de relevar características aerosólicas de zonas lejanas al lidar, pudiendo caracterizar mejor alguna inhomogeneidad atmosférica particular.

En la figura 3.4.2 se muestra la relación S/R para 355, 532 nm, y sus líneas Raman de nitrógeno correspondientes a: 387 y 607 nm, para los parámetros del lidar derivados a partir de esta simulación: seis telescopios y 10 segundos de adquisición.

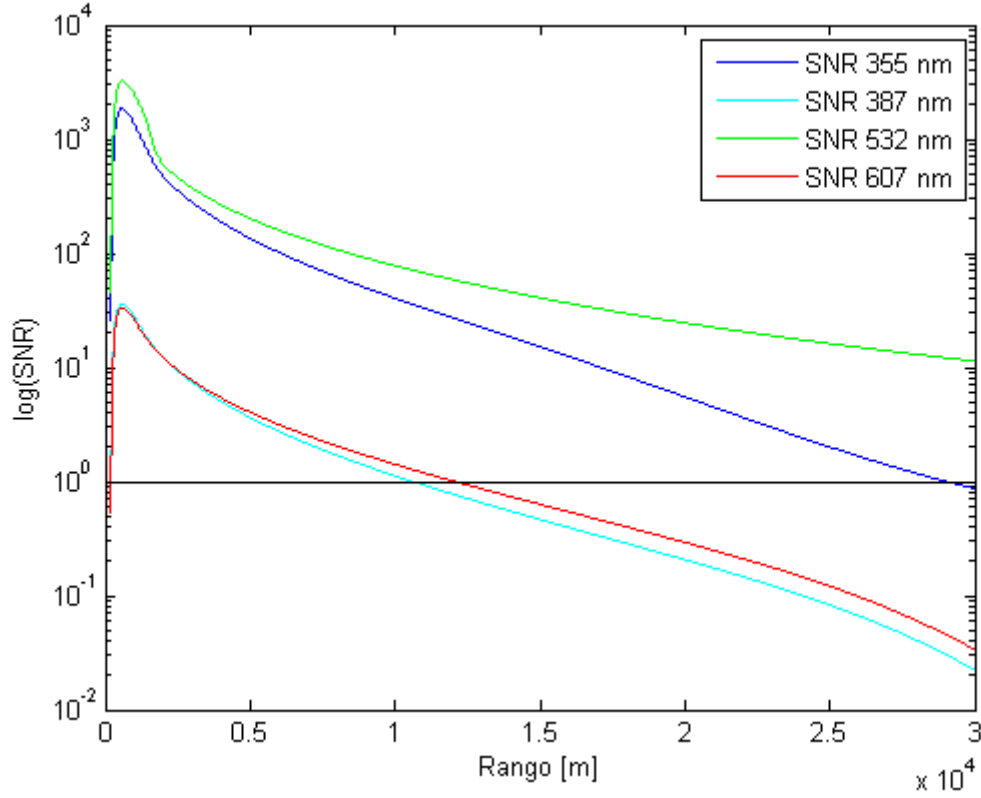


Figura 3.4.2: Simulación de la relación S/R para las líneas elásticas (355 y 532 nm) y sus respectivas retrodispersiones Raman del nitrógeno (387 y 607 nm). La escala logarítmica permite apreciar mejor el comportamiento a grandes alturas.

Los resultados de la figura 3.4.2 aseguran buenos niveles de señal a lo largo de toda la tropósfera. Considerando seis telescopios y un tiempo de adquisición de 10 s, se muestra en la siguiente figura las señales lidar esperadas. Las mismas se grafican corregidas en rango y en escala logarítmica para su mejor apreciación:

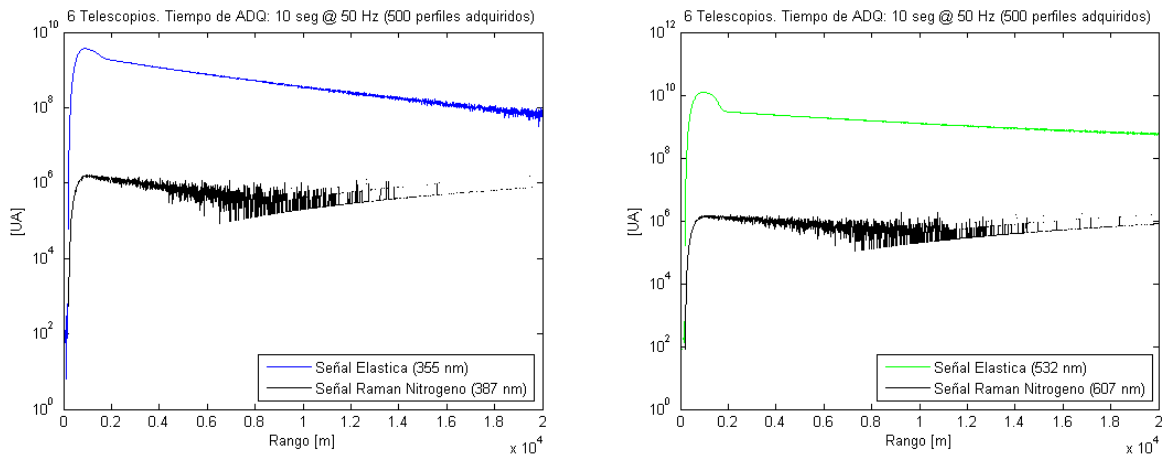


Figura 3.4.3: Señales simuladas con 10 segundos de adquisición a 355 y 532 nm con sus respectivas señales Raman de nitrógeno.

En estas sub-secciones se ha podido deducir en base a las especificaciones planteadas,

las principales características del lidar, desde la selección de sus componentes, hasta la obtención del área total de colección para cumplir con el rango necesario de medición. Para esto, se han tenido que modelizar parámetros de *hardware* (Sección 3.4.1) y de la atmósfera (Sección 3.4.2), en los que se incluye la definición del perfil de aerosoles. Cabe plantear entonces hasta qué punto son válidos los parámetros obtenidos en función del perfil de aerosoles, ya que es la parte más incierta del modelo utilizado en estas simulaciones. Este punto se discute en la siguiente Sección.

3.4.4. Alcance de los parámetros obtenidos con las simulaciones

El resultado principal obtenido de la simulación es la cantidad total de telescopios y el tiempo de adquisición necesario para cumplir una dada condición sobre la calidad de la señal. La condición utilizada consiste en una relación S/R mayor a la unidad en casi toda la tropósfera para la señal Raman de nitrógeno de 355 nm (la cual es 387 nm). Estos resultados se obtuvieron considerando un modelo de aerosoles definido con un AOD por encima de los valores medios, para de esta manera, asegurar mejores resultados en condiciones normales. Por lo tanto, es importante determinar cuanto puede variar la atmósfera, en particular, los parámetros ópticos de los aerosoles, para establecer en que casos la condición impuesta no se cumple, debiendo por lo tanto necesitar más tiempo de promediación. Como este análisis se realiza con los seis telescopios, la variable que se obtiene es el tiempo de promediación o cantidad de perfiles acumulados (*Acc*). Para esto, a partir de la expresión 3.4.3, se despeja *Acc*:

$$Acc = \frac{N_{phot}^{10km} + N_{photBkg}}{6 * \left(N_{phot}^{10km}\right)^2} \quad (3.4.4)$$

donde:

N_{phot}^{10km} : señal lidar Raman de 387 nm pura a 10 km para un único telescopio.

$N_{photBkg}$: señal de bias para un único telescopio.

Para realizar este análisis se procedió a simular la señal lidar bajo diferentes cargas aerosólicas con sus correspondientes valores de AOD.

En la figura 3.4.4, se observa la dependencia de la cantidad de perfiles acumulados que son necesarios para mantener la relación S/R=1 a 10 km, en función de diferentes valores de AOD considerados.

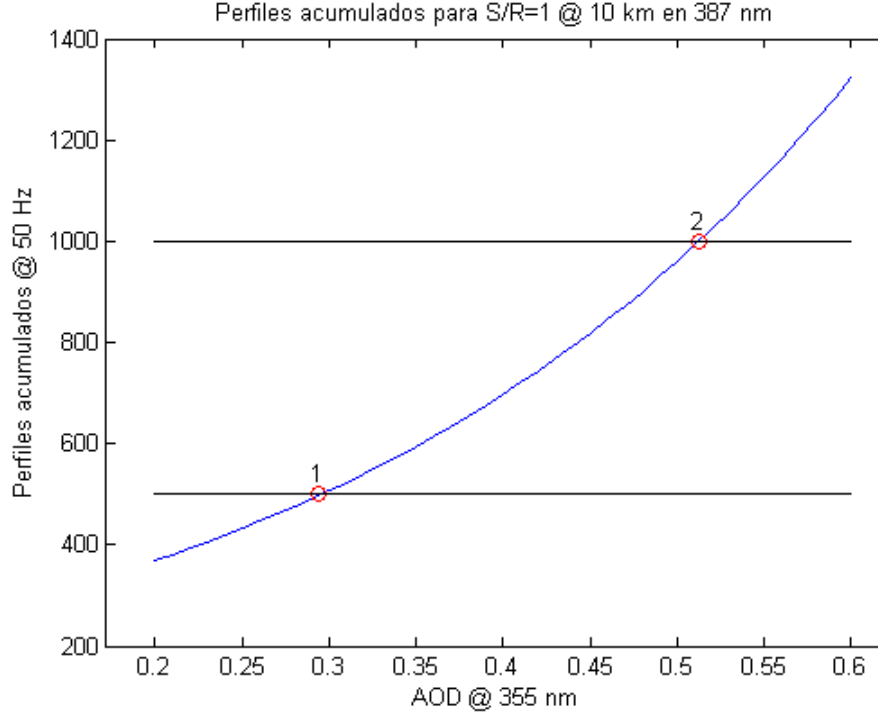


Figura 3.4.4: Número de los perfiles acumulados que deben considerarse para asegurar una $S/R=1$ @ 10 *km* en función de la variación del AOD a 355 *nm*.

En el gráfico de la figura 3.4.4 se observan dos resultados:

1. El punto “1” indica que la relación $S/N=1$ @ 10 *km*, con 500 perfiles acumulados corresponden a un AOD de $\sim 0,3$.
2. El punto “2” indica que para obtener una relación $S/N=1$ @ 10 *km*, con el doble de adquisiciones (1000 perfiles acumulados, 20 *s*) la condición de espesor óptico aerosólico sea de $\sim 0,5$, el cual, corresponde a un valor más que extremo en los sitios de los dos Observatorios.

El tratamiento del error aleatorio y su filtrado es tratado en el capítulo 7, y el procesamiento de la señal lidar para la obtención de los parámetros ópticos será abordado en el capítulo 8. Allí, se realizará también el análisis del error sistemático introducido en el proceso de inversión.

3.5. Conclusiones

En este capítulo se describió el diseño conceptual del lidar en base a las especificaciones generales y particulares enunciadas en la sección 1.4 el capítulo 1.

Se describieron los criterios de selección para los componentes que se debieron comprar, eligiendo los más adecuados. En cuanto a la óptica de recepción y la electrónica de adquisición, se tuvo en cuenta la experiencia de más de 20 años de la División Lidar, utilizando componentes de proveedores con conocidos resultados.

Se modelizó el *hardware* y la atmósfera a fin de realizar simulaciones de las señales lidar bajo condiciones poco favorables, asegurando mejores resultados en condiciones normales de trabajo. Las simulaciones de las señales lidar permitieron obtener la cantidad

de telescopios y el tiempo de adquisición óptimo para lograr señales de calidad en toda la tropósfera, las cuales permitan una correcta inversión de las mismas. Se concluye que el número adecuado de telescopios es de seis, y se requieren diez segundos de adquisición para cumplir con las condiciones impuestas por los Observatorios.

Capítulo 4

Construcción del lidar Raman multiángulo. Mecánica y electrónica

4.1. Introducción

La construcción del lidar Raman multiángulo ha necesitado de un trabajo de colaboración muy importante con diferentes grupos, tanto dentro de CITEDEF, como con grupos externos al instituto. Esto generó una importante interacción con profesionales de diferentes rubros como óptica, electrónica, y principalmente, mecánica.

En este capítulo se describen las principales características del *hardware* del lidar, detalles del proceso de selección de sus componentes y su construcción. Muchas de estas características han sido definidas en base a las simulaciones realizadas en el capítulo anterior (3), mientras que otras estarán basadas en diversos requerimientos prácticos y de experiencia previa de la División Lidar. Para esto, se ha contado con el apoyo del Departamento de Mecánica y Prototipos de CITEDEF (ver sección 4.2), y en algunos casos, se ha tercerizado el trabajo a diferentes empresas y/o grupos. Para esto, se ha trabajado en la definición de las especificaciones, dejando el diseño y la construcción a cargo de expertos en el tema. Se ha reportado una descripción de este trabajo en [97].

Se desarrolla este capítulo en dos grandes secciones: mecánica y electrónica de control. El punto importante de la mecánica está en el desarrollo del sistema de escaneo acimutal-cenital del lidar, dotándolo de la capacidad multiángulo, como también, del sistema de auto-alineación y soporte de los telescopios. Con respecto a la electrónica de control, deberá estar capacitada para controlar gran parte de la mecánica y los dispositivos del equipo, midiendo su estado por medio de los correspondientes sensores. Su diseño fue realizado íntegramente por parte del equipo de la División Lidar, tercerizando la construcción de las placas.

En todo este trabajo se ha puesto mucho énfasis en construir la mayor parte del sistema en el país, salvo algunos elementos como el láser y la óptica de filtrado, que por sus características no se fabrican en sudamérica. Todo el desarrollo de la construcción de este lidar fué debidamente reportado en diferentes *meetings* [98] [99].

4.2. Mecánica

Los principales trabajos en el área de la mecánica están focalizados en el sistema de escaneo acimutal/cenital, y en la mecánica de soporte y auto-alineación de los telescopios.

El sistema mecánico de escaneo acimutal/cenital debe proveer la capacidad multiángulo al sistema, permitiendo un movimiento suave del conjunto telescopios-láser, evitando su desalineación debido a vibraciones o movimientos bruscos. El control de los motores que gobiernan este sistema será abordado en la sección de la electrónica de control (4.3.3.2), el cual trabaja en conjunto con el *software* de la PC y el *firmware* del microcontrolador. En cuanto al sistema de auto-alineación de los telescopios, es necesario también un movimiento suave, controlado y repetitivo por medio de motores paso-a-paso. Las características relacionadas con los telescopios y su sistema de alineación será abordados en la sección 4.2.2.

Cabe aclarar que en esta sección sólo se hará hincapié en los requerimientos de cada componente del sistema, y en los resultados obtenidos. No se describirán los pasos del diseño y construcción de los mismos, ya que como se aclaró, fue realizado por diferentes equipos de trabajo, tanto de CITEDEF como de empresas privadas.

4.2.1. Sistema de escaneo cenital/acimutal del láser-telescopios

Se describirá en esta sección el sistema mecánico encargado de posicionar al láser junto con sus telescopios de recepción. El mismo consta de un sistema de posicionamiento acimutal/cenital que dotan al láser y a los telescopios de la capacidad de poder escanear el cielo en un ángulo sólido de 4π . Este sistema debe permitir un giro acimutal y cenital de 180° , pudiendo ser capaz de soportar el peso de los 6 telescopios de recepción, el láser y sus correspondientes soportes.

Se enumeran a continuación las especificaciones de la misma:

- Dimensiones:
 - Ancho límite: 2,14 *m* (incluido el motor cenital de escaneo). Este requerimiento es debido al ancho interno del contenedor que albergará al lidar.
 - Capacidad para albergar 6 telescopios de 40 *cm* de diámetro.
- Velocidad máxima de escaneo acimutal: 5 RPM.
- Velocidad máxima de escaneo cenital: 5 RPM.

El diseño utilizado para este trabajo es una modificación de un montaje más complejo utilizado en el proyecto SEON (Sistema Estabilizado de Observación Naval) de CITEDEF. Con la colaboración del Departamento de Mecánica y Prototipos, se ha modificado y adaptado para las necesidades del lidar multiángulo. En las siguientes figuras, se observa el diseño en 3D del proyecto original.

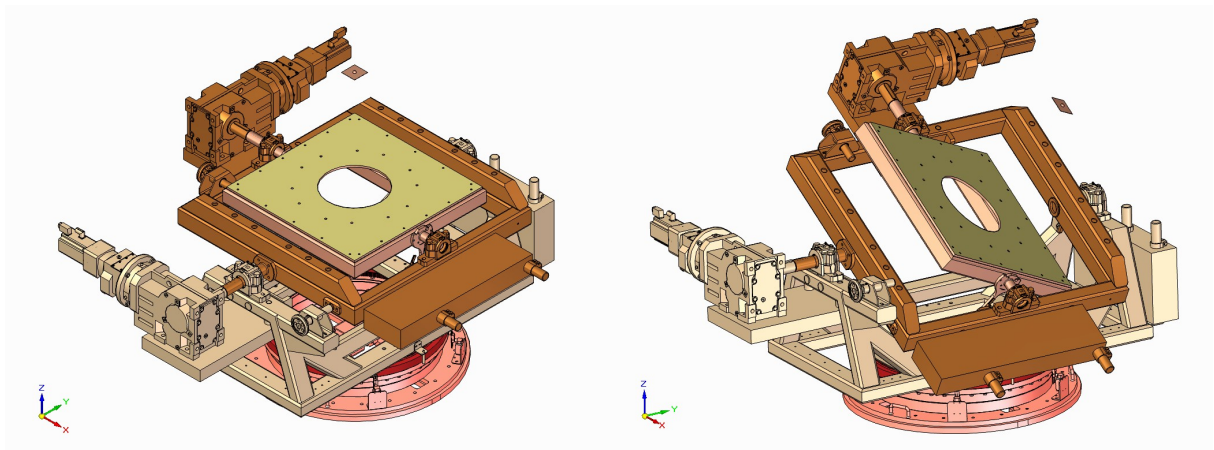


Figura 4.2.1: Plataforma de movimiento del proyecto SEON de CITEDEF.

El sistema original, además de los movimientos acimutal/cenital, posee una plataforma interna al marco cenital, la cual le agrega un grado más de movimiento. Esto no es necesario para este proyecto, por lo que se ha removido. Además, se modificó el cuadro de la plataforma cenital, para que pueda albergar a los 6 telescopios. Esta plataforma adquirió una forma hexagonal para la correcta ubicación de todos los elementos de recepción. Se muestra a continuación una foto en una de las etapas finales del proceso de construcción, en los talleres de CITEDEF, junto con imágenes de la estructura instalada dentro del contenedor-domo.

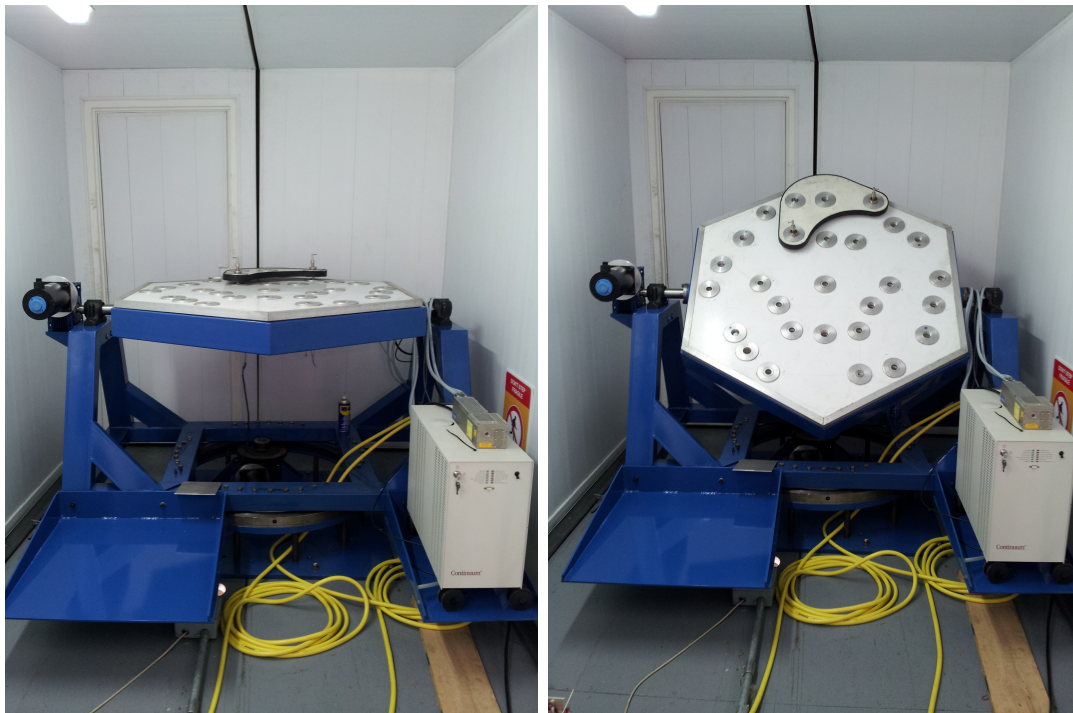


Figura 4.2.2: Estructura de escaneo del lidar. Durante su construcción en los talleres del Departamento de Prototipos de CITEDEF (arriba), e instalado en el contenedor domo del lidar (abajo).

La estructura fue realizada con caños estructurales de $80 \times 120 \text{ mm}$ de sección y 4 mm de espesor, dando al sistema gran solidez y bajo peso. Los avances del desarrollo de la estructura fue reportado en un *meeting* interno de la colaboración CTA [100] [101].

La disposición de los 6 telescopios es simétrica en torno al láser, el cual, es emitido desde el centro del hexágono. El plano, junto con la disposición de los mismos, se observa en la siguiente figura:

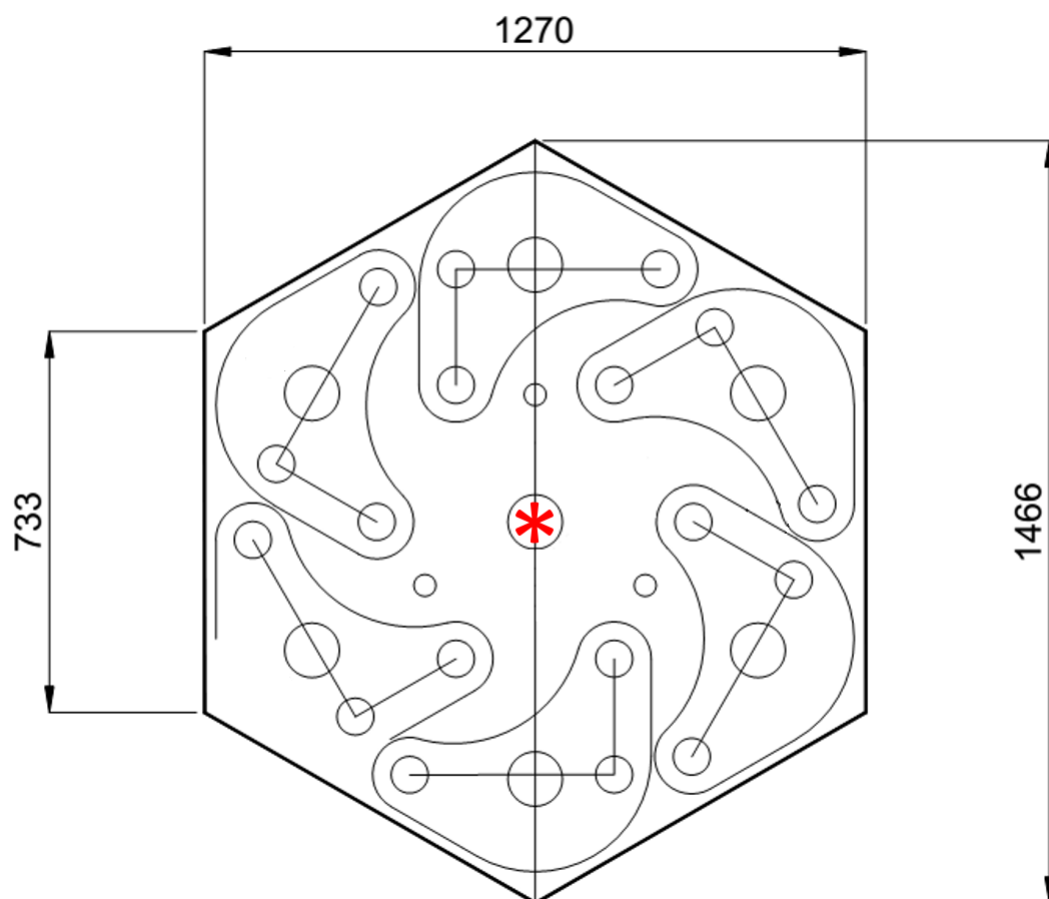


Figura 4.2.3: Disposición de los 6 telescopios sobre el plano de barrido cenital. En el centro del hexágono, se encuentra el orificio de salida del láser.

Cada una de las 6 figuras en forma de “L” que se observan en este plano, son los soportes de cada uno de los telescopios, los cuales les dan la posibilidad de alineación, tanto de manera manual como automática. Más detalles acerca de estas estructuras se darán en la sección 4.2.2.

Los motores utilizados para el barrido del sistema son del tipo paso-a-paso. Se han utilizado este tipo de motores por la facilidad en su control digital por medio del microcontrolador, y por el control de posición que se tiene de los mismos. Además, ambos motores, tanto en el eje cenital como en el acimutal, poseen instalados encoders, los cuales, permiten conocer las coordenadas reales del lidar.

Se muestran en la siguiente tabla un resumen de sus especificaciones:

Cant. de Fases	Ángulo de Paso [°]	Tensión [V]	Corriente /Fase [A]	Par de Mantenimiento [$kg * cm$]	Inercia del Rotor [$kg * cm^2$]	Diámetro del eje [mm]
3	1,2	80-325	6	37	48	19

Cuadro 4.2.1: Especificaciones de los motores paso a paso utilizados para el escaneo cenital/acimutal del lidar multiángulo.

A la salida de cada motor se colocó una caja de reducción 20:1, del tipo tornillo sin-fin y corona con salida a 90°. Esto se observa en la figura 4.2.4.

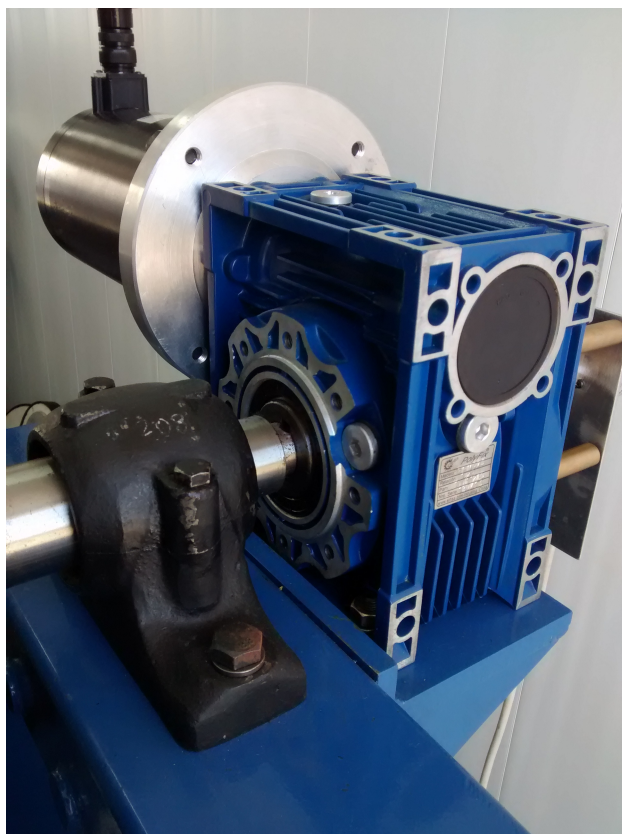


Figura 4.2.4: Foto del motor cenital con la transmisión instalada.

Como se planteó en las especificaciones, la velocidad de escaneo máxima se definió en 5 RPM ($30^\circ/\text{s}$). Esta velocidad es lograda cuando se debe apuntar hacia unas coordenadas particulares en el menor tiempo posible. Esto tomará 12 segundos como máximo, ya que es lo que se tarda para un barrido completo de 180° . Para controlar estos motores se utiliza el driver modelo Q3HB22M, el cual, permite controlarlo con las mismas señales de habilitación/dirección/paso, como al resto de los motores paso-a-paso utilizados en este trabajo.

4.2.2. Telescopios. Sujeción del espejo, soporte y sistema de alineación

La óptica de recepción de un lidar es uno de los elementos más importantes en lo que respecta a la calidad y cantidad de la señal detectada, por lo que su soporte y sistema de alineación cumplen un papel fundamental. La sujeción del espejo debe ser delicada, minimizando las deformaciones en la superficie del mismo, y permitiendo que todos los fotones colectados ingresen en la fibra óptica. Este problema se maximiza en este trabajo, ya que los mismo deben moverse debido a la capacidad multiángulo del sistema. Con respecto al sistema de alineación, debe trabajar tanto de forma manual como automática, pudiendo ser controlado por un *hardware* y *software* diseñado a medida. Esto permitirá a los telescopios poder alinearse con respecto al láser, maximizando la señal lidar y manteniendo la calidad de la misma.

Otro aspecto no menos importante es el tipo de sujeción del espejo, ya que pequeñas presiones sobre el vidrio generaran deformaciones sobre su superficie, dando como resultado aberraciones en su plano focal y la consecuente pérdida del señal. Se describen a

continuación los prototipos realizados.

4.2.2.1. Sujeción del espejo. Prototipos realizados

Para este trabajo, se han realizado pruebas de dos prototipos para la sujeción del espejo, los cuales fueron sometidos a testeos de estabilidad y calidad de imagen. Se realizará en esta sección una breve descripción de cada uno, junto con sus ventajas y desventajas.

Prototipo 1: Soporte radial en toda su circunferencia

Este primer prototipo se basó en la idea de evitar contacto puntual sobre el telescopio, ya que son los más nocivos para la calidad de imagen en su foco. Es por eso que se buscó distribuir la presión a lo largo de toda su circunferencia, por medio de 3 soportes realizados en fundición. Un diseño conceptual de este soporte, se observa en la siguiente figura:

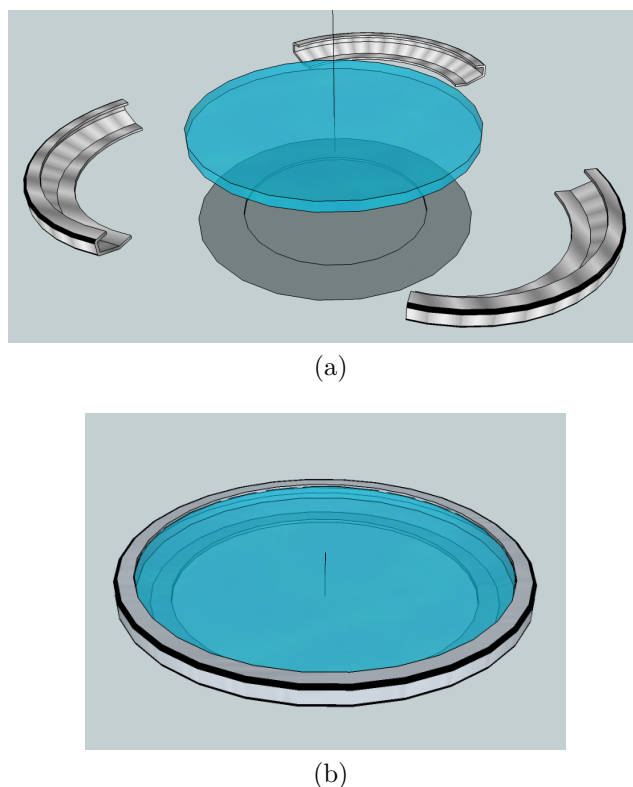


Figura 4.2.5: Diseño conceptual en 3D del primer soporte de telescopio realizado.

El espejo es sostenido sobre un disco de aluminio, el cual hace de base, y es fijado lateralmente por 3 bandas fabricadas a medida en fundición. Entre el espejo, su base y los soportes laterales, se colocó una interfaz de cuero, evitando presiones puntuales sobre el vidrio, disminuyendo las deformaciones sobre su superficie. Sobre estos soportes laterales se conectan los brazos del telescopio, sosteniendo la fibra óptica en su foco. Se muestra a continuación una imagen del soporte realizado:



Figura 4.2.6: Primer prototipo del soporte del telescopio.

Los resultados de estas pruebas tuvieron varios inconvenientes en cuanto a la estabilidad de la señal a diferentes ángulos cenitales. Esto fue debido a que los brazos del telescopio son sujetados desde los soportes laterales del telescopio, transmitiéndole al espejo tensiones a lo largo del barrido.

Prototipo 2: Soporte central por medio del pegado del espejo

Un método menos invasivo en cuanto a las deformaciones en la superficie del telescopio, consta del pegado del mismo desde su base. De esta manera, se disminuyen considerablemente las deformaciones, ya que se evitan las presiones sobre el vidrio. En la siguiente figura se muestra una foto de un espejo con su sistema de sujeción pegado a su base:

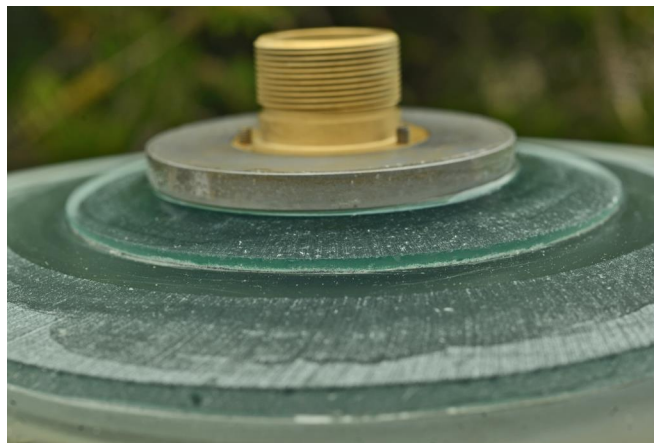


Figura 4.2.7: Parte inferior de la oblea del telescopio con su soporte pegado.

Los brazos del telescopio son sujetados desde el disco inferior, pero en este caso, no hace de base del mismo. De esta manera, se evita que las tensiones generadas en ellos se transmitan a la superficie del vidrio. En la siguiente foto, se observa el armado final de este sistema.

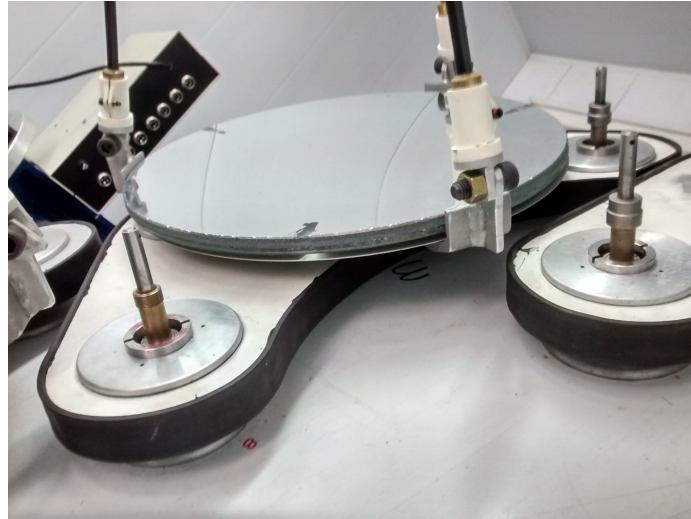


Figura 4.2.8: Versión final del telescopio con su sistema de soporte.

Otro detalle a tener en cuenta es la utilización de varillas de fibra de carbono para los brazos, las cuales reducen considerablemente el peso y aportan una estabilidad térmica superior a las del acero.

Los resultados obtenidos con este método fueron superiores a los obtenidos con el primero, siendo además de más fácil armado. Esto lo definió como el diseño a utilizar.

4.2.2.2. Sistema de alineación de los telescopios

Cada uno de los telescopios dispuestos simétricamente según la figura 4.2.3, requieren de un soporte que les permita su alineación con respecto al láser. Este procedimiento consta de disponer su campo de visión (FOV, según sus siglas en inglés), en el ángulo correcto para optimizar la señal detectada. En la figura 4.2.9 se muestra una representación del FOV del telescopio y la divergencia del haz láser, con el sistema de referencia utilizado (no en escala):

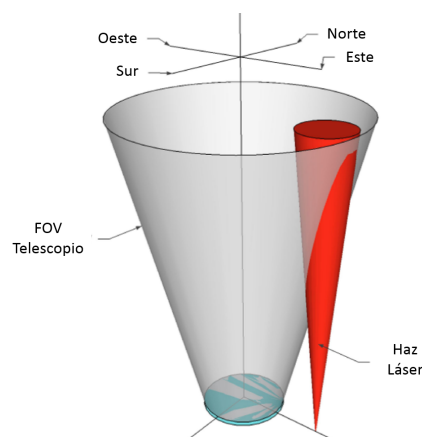


Figura 4.2.9: Representación esquemática del campo de visión del telescopio (FOV) y el láser (no en escala). Para una mejor descripción del sistema y sus movimientos, se muestra también, los nombres de los ejes de coordenadas utilizados.

Como se indica en la última figura, los movimientos necesarios para el telescopio son en dirección **Norte-Sur** y **Este-Oeste**. Para lograrlos, se montó cada telescopio sobre

una plataforma que le permita inclinarse en torno a un punto fijo, sobre las 2 direcciones planteadas. Dicha plataforma fue realizada con un panel de *honey-comb* de aluminio de 1 pulgada de espesor. En la figura 4.2.10 se muestra una foto de la misma.

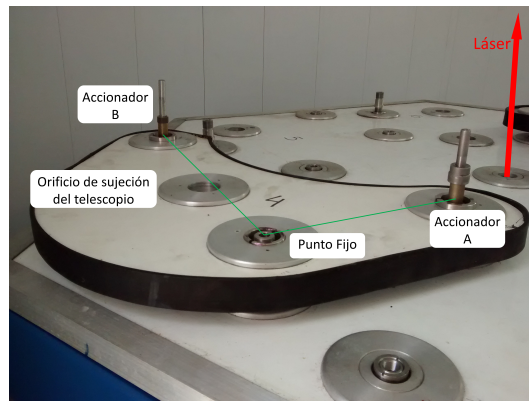


Figura 4.2.10: Plataforma de alineación del telescopio (sin el espejo). En el orificio central se conecta el telescopio por medio de su sistema de sujeción.

En la última figura se observa el punto fijo en el cual se inclina el telescopio sobre sus dos ejes ortogonales: un eje permite cruzar el campo de visión del telescopio con el láser por medio del accionador 1 (dirección de movimiento **Este-Oeste**, figura 4.2.9), y del accionador 2 (dirección de movimiento **Norte-Sur**). El mecanismo de transmisión que une el motor con la placa de alineación del telescopio fue descrito en [102] [103] [104]. Se realizaron 2 modelos de estos actuadores, donde prevaleció el más compacto, donde además posee menos piezas que la primera versión [105].

El proceso de alineación puede ser realizado tanto en forma manual como remota/automática (capítulo 6). La forma manual se realiza desde la parte superior de cada accionador, y la remota/automática por medio de motores paso-a-paso instalados en la parte inferior del mismo. Ambos controles se observan en la siguiente figura:

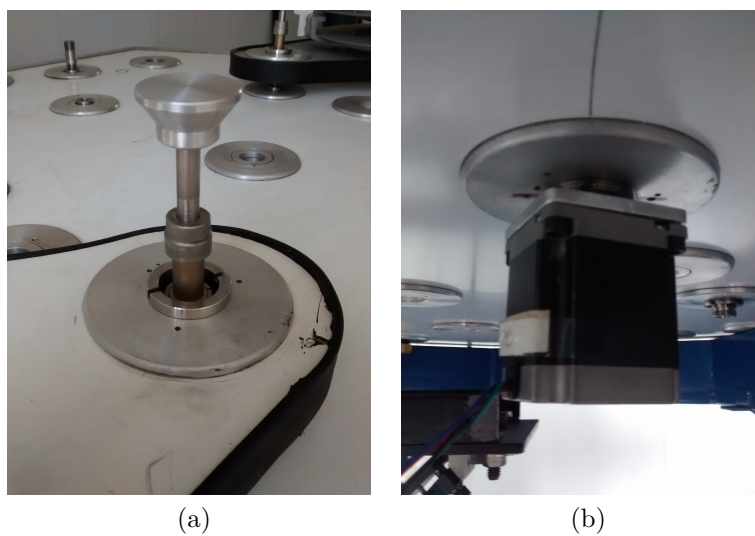


Figura 4.2.11: Controles de alineación de cada telescopio. (a) Control manual accedido desde la parte superior. (b) Control automático/remoto, ejecutado por medio de motores paso-a-paso.

Cada una de estas plataformas de escaneo van montados sobre la placa hexagonal de *honey-comb* descrita en la figura 4.2.3 de la sección anterior. Estas plataformas poseen un orificio el cual se conecta el sistema de sujeción del espejo del telescopio (ver figura 4.2.10), y los brazos que sostienen la fibra óptica en su foco.

El sistema mecánico que permite la alineación en cada uno de los extremos de la plataforma de escaneo tiene una resolución de 1 *mm*/vuelta. Los motores utilizados para el accionamiento automático de este sistema son del tipo paso-a-paso, modelo 23H2A5406, los cuales se los configuró en modo *full-step* (1,8°/paso).

Como puede observarse en la figura 4.2.10, la plataforma de alineación con la que cuenta cada telescopio, posee diferentes largos desde el punto fijo a cada uno de los accionadores. Esto dará como resultado diferentes resoluciones para cada plano de inclinación en su proceso de alineación. Las distancias al punto fijo de cada accionador, junto con la resolución para 1 paso de motor son las siguientes:

Accionador	Distancia al punto fijo	Resolución auto-alineación
A	22 <i>cm</i>	0,0227 <i>mrاد</i> /paso
B	39,5 <i>cm</i>	0,01265 <i>mrاد</i> /paso

Cuadro 4.2.2: Características de la plataforma de alineación de los telescopios.

La resolución mostrada en el cuadro anterior está calculada en función de la inclinación adoptada por el eje del telescopio por cada paso dado por el motor. Como se verá en el capítulo 6, esta resolución es más que suficiente para el procedimiento de auto-alineación. Estos datos serán retomados en el capítulo 6, sección 6.4.2 donde se abordará de manera detallada este proceso.

4.2.2.3. Factor de *overlap* resultante

Con las características del telescopio, el láser y su posición relativa ya definidas (distribuidas en base a la figura 4.2.3), se está en condiciones de simular la función *overlap* del sistema. Este nos da la información de la proporción de fotones detectados por el sistema receptor en función de la altura en la que se encuentra el pulso láser. El conocimiento de esta función es muy importante ya que posee la información de la alineación láser-telescopio, y modula los demás factores de la ecuación lidar. Si la alineación no es la correcta, la calidad de la señal lidar obtenida se verá afectada, produciendo un error en los coeficientes atmosféricos obtenidos en la inversión. Simular este parámetro es muy importante ya que nos permite mejorar el conocimiento de la señal esperada, como también, poder realizar un correcto estudio para el diseño del sistema de auto-alineación (desarrollado con detenimiento en el capítulo 6). Resultados de estos estudios han sido presentados en [106] .

Este factor depende de las condiciones geométricas del sistema, tales como: distancia láser-telescopio, FOV del telescopio y divergencia del láser, entre otros. Para conocer este factor, se realizó un *software* basado en agentes [107]. Este es un método computacional para simular comportamientos de acciones de una gran cantidad de agentes autónomos, (en este caso, los fotones) donde su comportamiento es programado por medio de reglas. Este algoritmo es detallado en el apéndice A. También, en el capítulo 6, se dará una descripción detallada de este factor.

Los parámetros utilizados para el cálculo de este factor se listan en el cuadro 4.2.3.

Parámetro	Valor
Diámetro del telescopio	40 <i>cm</i>
FOV del telescopio	1 <i>mrad</i>
Distancia láser-telescopio	50 <i>cm</i>
Radio inicial del láser	6 <i>mm</i>
Divergencia del láser	0,7 <i>mrad</i>

Cuadro 4.2.3: Parámetros del lidar utilizados para la simulación del *overlap*.

El resultado obtenido se observa en la figura 4.2.12 [108].

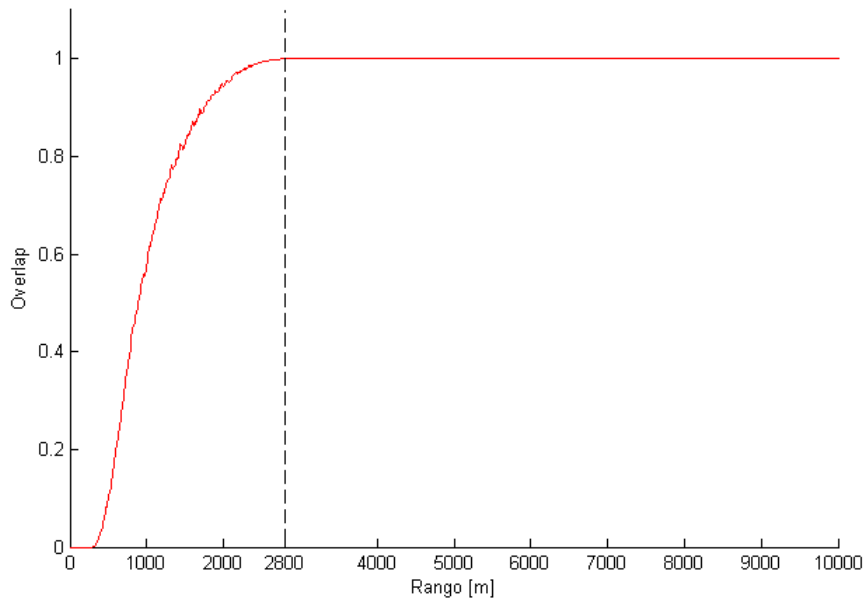


Figura 4.2.12: Factor de *overlap* de cada telescopio, resultante de la configuración listada en el cuadro 4.2.3.

Se observa en esta figura que, bajo la condición de una correcta alineación, se alcanza un *overlap* igual a 1 aproximadamente a los 2800 *m*. En el capítulo 6 se darán detalles acerca de este factor, y del sistema de auto-alineación realizado para este trabajo, el cual dota al sistema de la capacidad de recuperar la alineación óptima en caso de una eventual desalineación.

Es necesario remarcar un detalle acerca del factor de *overlap* logrado en este lidar, ya que su valor de *full-overlap* se da a una distancia donde en la gran mayoría de los casos no podrá relevar el perfil de la capa límite atmosférica. Esto es debido a que se utiliza como **rango útil** para la inversión de la señal al correspondiente de los valores en que se cumple *overlap*=1. De no ser así, el resto de la ecuación lidar se encontrarían modulada por esta función, produciendo errores en los resultados de la inversión. El principal motivo de esto son los 50 *cm* de separación entre los ejes del láser y el telescopio. En los lidars de aerosoles convencionales, donde se posee 1 solo telescopio, se busca que esta distancia sea la menor posible, siendo en algunos casos, co-axiales. En este caso, al poseer 6 telescopios, la condición extrema en donde todos posean la **menor distancia al láser y en posición simétrica**, debe ser como lo muestra la figura 4.2.13.a. En la figura 4.2.13.b, se observa el factor de *overlap* resultante.

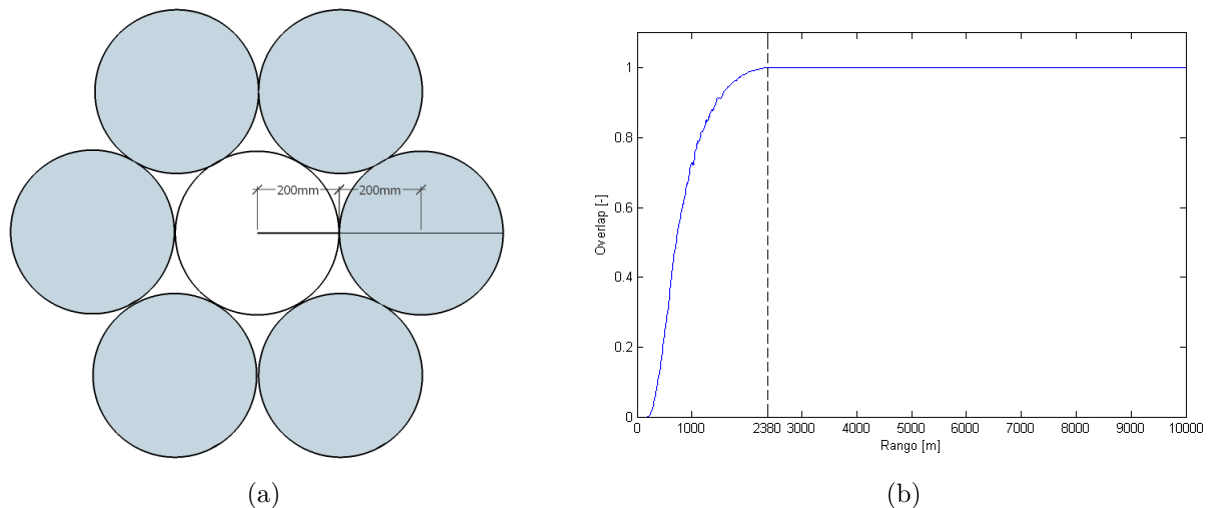


Figura 4.2.13: (a) Disposición teórica de mayor acercamiento de los telescopios entre sí y con respecto al láser. (b) Factor de *overlap* resultante de la disposición de (a).

Bajo esta disposición, sólo lograría un acercamiento de 10 *cm* entre el eje del láser y el de cada telescopio (separación de 40 *cm* entre ejes), con respecto a la opción construida en este trabajo (figura 4.2.3). Esto se traduce en un factor de *full-overlap* a los 2400 *m* (400 *m* antes que en el caso planteado). Este planteo es un problema muy difícil de resolver desde el punto de vista mecánico, principalmente debido a que disponer los telescopios tan cerca unos de otros, se haría imposible la inclinación de los mismos para su alineación, con el agregado de una construcción del soporte mas pequeño y complejo. Todo este problema mecánico no soluciona en gran medida la obtención de un *full-overlap* a distancias más bajas, ya que 2400 *m* siguen siendo lo suficientemente elevado para relevar alturas de capa límite atmosféricas.

Las soluciones planteadas a este problema se desarrollarán en los capítulos 6 y 8. En el primero se muestra la corrección de una señal lidar adquirida para poder relevar perfiles desde rangos más bajos de la atmósfera. En el segundo, se expondrá el método de inversión multiángulo (entre otros aplicados en este trabajo). Este método permite la obtención del AOD en la capa límite atmosférica (CLA) sin la necesidad de relevar el **perfil** de $\alpha^p(r)$ a lo largo de la misma.

4.2.3. Contenedor-domo

Debido a la capacidad multiángulo del lidar, es necesario contar con gran parte del horizonte despejado, permitiendo realizar el escaneo a diferentes ángulos acimutales/cenitales durante la adquisición. Además, en los períodos en donde no se mide, todo el sistema debe estar protegido del clima, principalmente de la lluvia y vientos fuertes.

Los principales requerimientos se pueden resumir en:

- Vista despejada para ángulos cenitales menores a 60°.
- Portabilidad para ser trasladado al sitio del Observatorio requerido.
- Simplicidad en el diseño y tiempo de construcción.
- Precio.

La opción más viable encontrada fue la de modificar un contenedor estándar de 20 pies de largo (5,898 m), con la capacidad de apertura a la mitad, como se observa en la figura 4.2.14.



Figura 4.2.14: Vista general del contenedor-domo que alberga al lidar multiángulo.

La construcción del mismo fue tercerizado a la empresa 4Housing, con la cual se ha trabajado en conjunto para la definición de las principales características en base a las posibilidades de construcción. Las paredes internas han sido aisladas térmicamente con espuma de poliuretano, y recubiertas con paneles plásticos preparados para la intemperie.

Para la apertura y cierre, el contenedor posee 2 cilindros hidráulicos, los cuales pueden ser controlados manualmente desde un panel de control. En la figura 4.2.15 se muestran fotos del sistema.



Figura 4.2.15: Imagen de uno de los cilindros de apertura cierre (derecha), y sistema de bomba y panel de control (izquierda).

Cada una de las mitades del contenedor están calculadas en un peso de 2,5 toneladas, por lo que el equipo hidráulico instalado posee las siguientes características:

- Vástago de 2" de diámetro y una carrera de 900 *mm*.
- Presión de trabajo máxima de 150 *bar*, fuerza de tracción máxima 15 T (3,75 T según ángulo de montaje 15°).

En cuanto al equipo de la bomba hidráulica, se ha dimensionado para una velocidad de actuador de 0,28 *m/min*, y posee las siguientes características:

- Bomba doble de 2 x 2,1 *cm*³/rev. (2x3 l/min).
- Motor de 2 HP - Trifásico.
- Depósito de 60 litros.
- Dos válvulas direccionales doble solenoide.
- Dos reguladoras de presión.
- Dos válvulas de retención pilotada en línea de seguridad.
- Dos válvulas de contrabalanceo dobles.
- Dos filtros de succión.
- Boca de carga con filtro.
- Indicador de nivel y temperatura.

Desde su panel de control (figura 4.2.15, derecha) se tiene acceso al control ON/OFF de la bomba, al control de la apertura y cierre, y a las paradas de emergencia. Una parte importante de esta tesis es la automatización del sistema, por lo que se ha intervenido a este panel por medio de relés. De esta manera, y por medio de la electrónica/*software* de control, se pueden accionar la apertura/cierre del contenedor.

4.3. Electrónica

Desde la orden generada remotamente en la PC de Control, hasta su ejecución en el lidar, existe una electrónica encargada de realizar diferentes tareas para que el comando se lleve a cabo. Esta electrónica consta desde la comunicación inalámbrica que vincula la PC de Control con el lidar, hasta los relés, sensores y láser encargados de la operación del sistema.

Se puede dividir la electrónica del Lidar Multiángulo en 3 puntos principales:

- Comunicación.
- Adquisición.
- Control del Lidar Multiángulo.

Las órdenes de control son generadas por el operador desde un *software* realizado *ad-hoc* para este trabajo, el cual se ejecutan en la PC de Control remoto (una descripción detallada de este *software* se dará en el capítulo 5). En el contenedor del lidar, un microcontrolador se encarga de decodificar estas órdenes, y generar las señales de control correspondientes. La conexión entre el microcontrolador y los diferentes dispositivos es realizada por medio de interfaces diseñadas y construidas para este trabajo. Estas interfaces permiten escalabilidad, dando lugar a futuras actualizaciones, y además aportan seguridad en cuanto a la aislación eléctrica con el microcontrolador.

Un diagrama general de la disposición planteada se muestra en la figura 4.3.1.

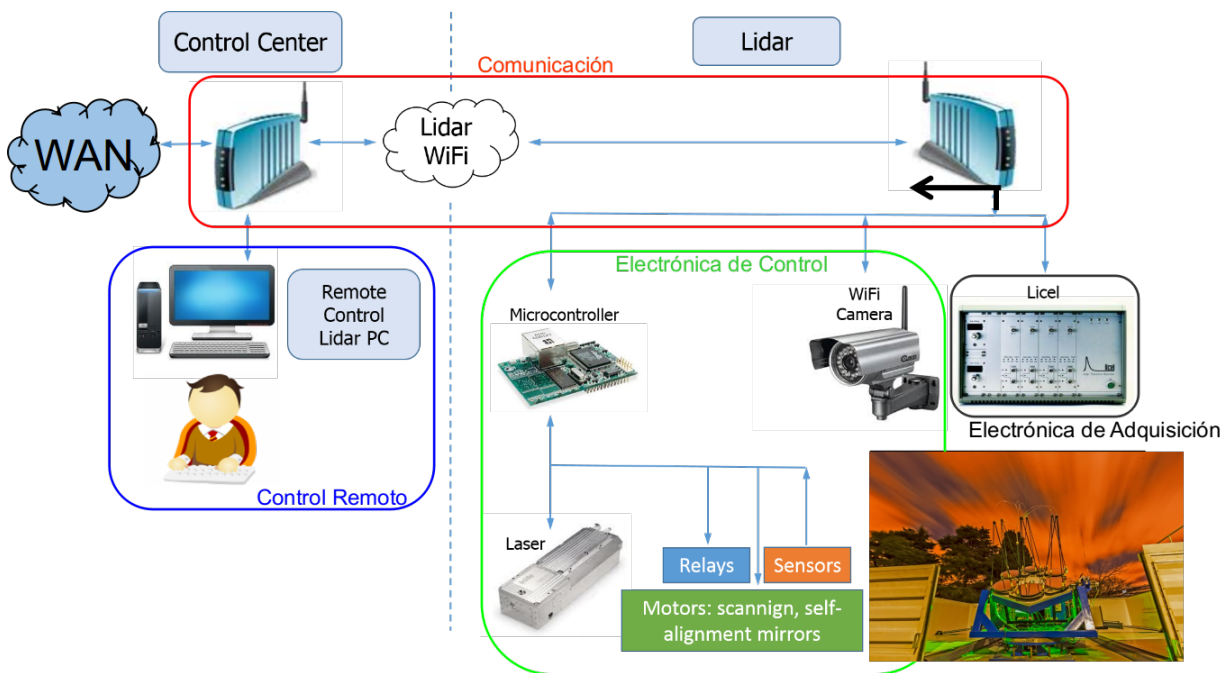


Figura 4.3.1: Diagrama esquemático del sistema Lidar Raman Multiángulo, donde se observan las diferentes vinculaciones entre los diferentes dispositivos.

Como se puede observar, existen varios dispositivos que son accionados por el microcontrolador, ya sea de manera automática, o respondiendo a una orden de la PC de control. De esta forma, el microcontrolador tiene acceso a:

- Láser, por medio del puerto serie.
- Relés, por medio de la interfaz de salida (ver sub-sección 4.3.3.4).
- Sensores, por medio de la interfaz de entradas (ver sub-sección 4.3.3.3).
- Motores, tanto de escaneo como de auto-alineación, por medio de la interfaz de motores (ver sub-sección 4.3.3.5). Debido que todos son del tipo paso-a-paso, las señales necesarias para todos son las mismas: *habilitación*, *dirección* y *paso*. Como se verá en la correspondiente sección, tanto *dirección* y *paso* comparten la mismas líneas, mientras que la señal de *habilitación* es generada en función del motor que se desea mover.

En cuanto a la electrónica de adquisición, es conectada directamente al *router* por medio de su interface Ethernet, mientras que la cámara web, lo hace por medio del vínculo WiFi.

Esta disposición será tenida en cuenta en la programación, tanto de los procesos a ejecutarse en la PC de Control como del *firmware* del microcontrolador (capítulo 5).

4.3.1. Comunicaciones

El enlace entre la PC de Control y el lidar es realizado por medio de un enlace WiFi. Este tipo de conexión no plantea prácticamente ninguna desventaja, cumpliendo con todas las necesidades para este sistema. Además de la modularidad y escalabilidad que brinda, la velocidad que ofrece es más que necesaria para cumplir con las necesidades de este trabajo. También, su disponibilidad en el mercado local es muy grande, evitando cualquier problema en el caso de ser necesario su reemplazo.

La conexión entre la PC de Control y el lidar se ha realizado instalando en ambos extremos del enlace routers con capacidad WDS (Wireless Distribution System). De esta manera se logra vincular 2 routers, permitiendo que dispositivos que se encuentran conectados a ambos extremos formen parte de la misma red. Los routers utilizados en este trabajo son de la marca **TP-Link**, modelo **TL-WR543G**, los cuales trabajan bajo la norma IEEE 802.11g, con una velocidad teórica máxima de 54 Mbps, lo que en la práctica, en modo *half-duplex*, se tiene una velocidad aproximada de 22 Mbps tanto para la transmisión y la recepción. Estos valores son más que suficiente para el uso de este trabajo, ya que la máxima transferencia de información se da en el envío del archivo adquirido por parte de la electrónica de adquisición. Un dimensionamiento de la necesidad del canal de WiFi para este trabajo se pueden listar en:

- Envío del archivo con las señal recién adquiridas. Este archivo, formado por un *header*, más las 6 señales lidar con 4000 bins cada una posee un tamaño de 94,45 kbytes.
- Envío de los comando necesarios para la obtención de parámetros del lidar por parte de la PC de Control. Estos comandos están formados por 100 bytes, los cuales siguen un protocolo que será detallado en el capítulo 5, sección 5.2.

Si se define el tiempo de adquisición de la señal lidar en 10 segundos (según simulación del capítulo 3), la transferencia del archivo requerirá una velocidad de 75,56 kbps. Esta velocidad está muy por debajo de los 22 Mbps disponibles en este enlace, cumpliendo con el requerimiento de velocidad de manera satisfactoria.

Otra de las ventajas que se presentan al utilizar *routers* WiFi es la simplicidad de configuración de la red, ya que la distribución de direcciones IP es realizada desde el *router*, reservando las direcciones IP correspondientes a cada dispositivo por medio de sus direcciones MAC. En cuanto a la seguridad de la red, se ha configurado un filtrado por MAC-Address, en el cual solo se permite la conexión a los dispositivos involucrados en el lidar.

Como se observa en la figura 4.3.1, el lidar es controlado remotamente desde la PC de Control, pero también se tiene que tener la posibilidad de realizarlo *in-situ*, como por ejemplo, para tareas rutinarias de mantenimiento. Esto da lugar a la necesidad de disponer de la señal WiFi en toda el área del contenedor que alberga al sistema. Para esto,

se debió instalar un divisor de señal a la salida del *router*, el cual permita conectar no solo la antena direccional (apuntando hacia el edificio de control), sino también de disponer de la antena unidireccional del *router* (figuras 4.3.2). Con esta última, se tendrá señal disponible en cualquier lugar del lidar multiángulo para su operación desde una notebook dispuesta para tal fin.

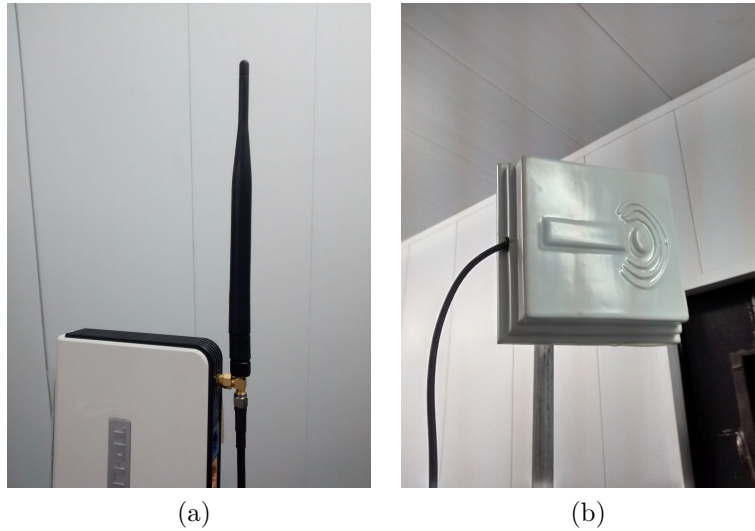


Figura 4.3.2: (a) Divisor de señal a la salida del router ubicado en el lidar. Se observa la antena unidireccional que brinda señal WiFi en todo el contenedor en casos de conectarse por tareas de mantenimiento en el lugar. (b) Antena direccional que apunta a su contraparte ubicada en el router con la PC de Control.

Esto da la posibilidad de poder conectar cualquier otro dispositivo en el lidar con interface WiFi, teniendo ya la la comunicación con el centro de control resuelta.

4.3.2. Electrónica de adquisición

Para la adquisición de las señales lidar, se ha utilizado los modelos **TR 20-160** de la empresa Licel [94], especializada en la construcción de dispositivos electrónicos para lidares, los cuales son ampliamente utilizados alrededor del mundo. La División Lidar del CEILAP los viene utilizando prácticamente en todos sus desarrollos, en sus casi 20 años de experiencia en el tema.

Esta electrónica posee la característica de reunir en un solo módulo la capacidad de fotocorriente y fotoconteo. La primera opción es la utilizada en la detección de señales lidar elásticas, mientras que la segunda, es utilizada para la detección de señales lidar Raman. Además, esta electrónica posee conectividad Ethernet para la transferencia de los datos, lo que permite ser conectada directamente al router instalado en el lidar.

Sus especificaciones técnicas se listan en el cuadro 4.3.1.

Adquisición en modo Analógico	Adquisición en modo Fotoconteo
Rango de entrada: 0-20, 0-100, 0-500 mV	Umbral de detección: 20, 100 mV
Resolución A/D: 12 Bit	Resolución del discriminador: 64 niveles
Frecuencia de muestreo: 20 MSPS	Máx. frecuencia de conteo: 250 MHz
Resolución espacial lidar: 7,5 m	Resolución espacial lidar: 7,5 m

Cuadro 4.3.1: Especificaciones generales de los módulos de adquisición Licel.

Se han marcado en este último cuadro los parámetros más importantes referidos a la señal lidar y su resolución. Estos son:

- Adquisición analógica:
 - Frecuencia de muestreo (*Sampling Rate*): **20 MSPS** (T=50 ns). Esto da como resultado una resolución espacial de **7,5 m**.
 - Resolución del digitalizador (*A/D Resolution*): **12 bits**. La cuenta adquirida para cada *bin* se almacena en una memoria la cual contiene la suma durante el tiempo de adquisición seteado. Terminada esta acumulación, su valor es transferido en una variable *int* de 32 bits.
- Adquisición Digital:
 - Máxima frecuencia de muestreo (*Max. count rate*): **250 MHz**. Para un ancho de bin de 50 ns, nos da un máximo de 12,5 cuentas/bin.
 - Límites de disparo (*Threshold*): pueden ser configurados desde la PC de Control por medio de comandos correspondientes.

El modelo utilizado en este trabajo es el **TR 20-160**, donde el 20 significa la frecuencia de adquisición en modo analógico (20 MHz), y el 160 hace referencia a la cantidad máxima de bins que puede adquirir: 16.384. Como cada bin es entregado en una variable *unsigned int* de 4 bytes, el mismo posee una memoria interna de 64kb para poder almacenar un perfil completo de 16.384 bins.

En la figura 4.3.3 se observa los bloques principales del un módulo **TR 20-160** como el utilizado para este trabajo, con sus etapas de detección analógica y digital en el mismo módulo:

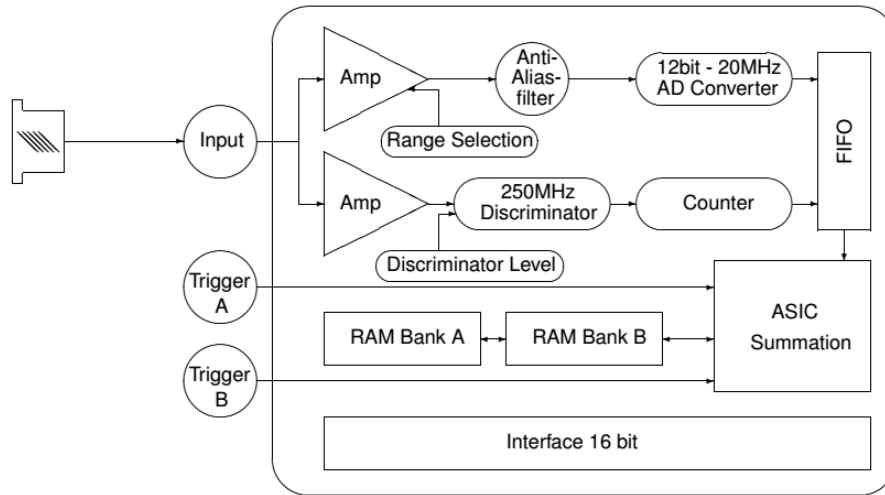


Figura 4.3.3: Diagrama en bloques del Licel utilizado en esta trabajo [94].

Con respecto a la detección analógica, se observa en la parte superior la etapa amplificadora, la cual, posee la información del rango máximo configurado (20, 100 o 500 mV), seguida del filtro anti-alias con una frecuencia de corte de 10 MHz. Luego el conversor A/D de 12 bits a 20 MHz digitalizan el perfil de la señal lidar con una resolución de 7,5 m. Este perfil es transferido a la memoria FIFO, el cual, luego de cada pulso, es sumado al perfil anterior y almacenado en el banco de memoria que recibió el *trigger*. En estas memorias se almacena la suma de perfiles lidar previamente configurados.

En cuanto a la etapa de fotoconteo, luego de la amplificación de la señal de entrada, se encuentra el discriminador de 250 MHz. De la misma manera que en la etapa analógica, en el banco de memoria correspondiente, se almacena la suma de cuentas realizada durante el tiempo de adquisición.

Los diferentes *triggers*, son en función del banco de memoria en la cual se desea almacenar la información, pudiendo por lo tanto, adquirir simultáneamente señales en fotoconteo y fotocorriente.

En la figura 4.3.4 se observa una imagen frontal del módulo Licel utilizado en este trabajo:



Figura 4.3.4: Vista frontal del *rack* conteniendo los 3 módulos Licel.

Se observa en la parte inferior de cada módulo, las dos entradas BNC para los diferentes *triggers*, y en la parte superior, la entrada para la detección analógica (fotocorriente) y digital (fotoconteo).

4.3.3. Electrónica de control

Se describirá a continuación los principales módulos que forman parte de la electrónica de control del lidar. Esta electrónica tiene la tarea de controlar todos los dispositivos dentro del contenedor, activando y censando su estado, e informando en todo momento a la PC de Control por medio del microcontrolador. Este dispositivo controla el resto del equipamiento por medio de interfaces de entrada (para los sensores) y de salida (para los relés). Estas interfaces fueron diseñadas bajo la premisa de contar con la capacidad de expansión, en caso de que futuros instrumentos sean instalados en el sistema.

También se diseñó y desarrolló una interfaz para los motores, la cual, es capaz de controlar tanto los de escaneo acimutal/cenital como los 12 de auto-alineación correspondientes a los telescopios. Esta electrónica fue pensada, diseñada y construida para administrar a todos estos motores con las mismas líneas de control del microcontrolador.

Un punto conceptual importante en el diseño de esta electrónica, es su uso genérico, la cual, pueda ser fácilmente adaptada y utilizada en cualquier equipo que desee un control remoto vía WiFi. Esto significa que no sólo tiene una implementación en el lidar de este trabajo, sino es un sistema basado en un microcontrolador, el cual administra señales de entradas y salidas en función de las órdenes recibidas remotamente. Estas órdenes son mensajes entre la PC de Control y el microcontrolador que siguen un protocolo simple, el cual, fue diseñado para este trabajo. El detalle del mismo es desarrollado en el capítulo 5. A continuación, una descripción de sus principales características.

4.3.3.1. Microcontrolador

La tarea principal del microcontrolador es la de recibir los mensajes vía TCP/IP por parte de la PC de Control, decodificarlos y traducirlos en señales de control hacia los diferentes dispositivos. Además, se encarga de leer el estado de todos los sensores, manteniendo la seguridad del sistema por medio del chequeo de posibles combinaciones prohibidas. Estas combinaciones son en función de los valores que toman los diferentes sensores combinados con el estado de los relés.

Por lo tanto, la tarea principal del microcontrolador es la de responder órdenes de la PC de Control, sólo tomando decisiones para casos de alarmas, los cuales requieren una respuesta rápida por motivos de seguridad. Su tarea, y por lo tanto, el diseño y programación del *firmware*, está enfocado a ser un “transductor” de las órdenes recibidas vía TCP/IP generando las señales de control hacia los diferentes dispositivos. Esto, junto con las interfaces de entrada/salida de la electrónica de control, permite poseer un sistema adaptable a otros lidares que deseen de un acceso remoto, debido a la característica genérica del mismo.

Una lista de las principales tareas a las que debe responder el microcontrolador son:

- Control de relés.
- Lectura de sensores (de movimiento, fines de carrera y *encoders* de los motores de escaneo).

- Envío de comandos hacia el láser (a través del puerto serie), y reenvío de la respuesta hacia la PC de Control (a través del enlace WiFi).
- Comandos para los motores (de alineación de los telescopios y los de barrido).

Los detalles del *firmware*, y la forma de administrar estas tareas se explicarán en el capítulo 5, sección 5.3. Se listan a continuación los requisitos que debe cumplir el microcontrolador, dividido en primarios y secundarios en función de las prioridades necesarias para el lidar:

Requisitos primarios del microcontrolador:

- **Interfaz Ethernet o WiFi:** se encargará de decodificar los comandos enviados por la PC del operador y generar las señales de control hacia los dispositivos correspondientes por medio de sus interfaces. Estas interfaces vinculan los pines del microcontrolador con los diferentes dispositivos de una manera más eficiente, centrándose principalmente en el ahorro de pines en caso de futuras actualizaciones.
- **Interfaz RS-232:** utilizado para la comunicación con el láser.

Requisitos secundarios:

- **Capacidad de servidor Web:** Para un fácil acceso a sus recursos por medio de una programación gráfica.
- **Cliente de mail:** Para una implementación más completa del sistema de alarmas. La implementación de esto sería el envío de un *e-mail* al encargado del equipo en casos de alguna falla severa, la cual requiera mantenimiento.
- **Multitarea:** Para una implementación más efectiva de las diferentes tareas a realizar.
- Documentación disponible, ejemplos, cursos y experiencia previa.

El módulo-microcontrolador utilizado es el **Rabbit RCM2200**, de la empresa Digi International [109], especializada en dispositivos dedicados al control de sistemas distribuidos. Las principales características del módulo usado son:

- Microprocesador: Rabbit 2000 @ 22.1 MHz.
- 26 pines de entrada/salida: 16 configurables para entrada/salida, 7 entradas fijas, 3 salidas fijas.
- Puerto Ethernet.
- Puerto serie.
- 8 líneas de datos (D0–D7).
- 4 líneas de direcciones (A0–A3).
- 5 *timers* de 8 bit y 2 de 10 bits.
- Memoria flash de 256 Kb.

- Permite la programación por medio del lenguaje **Dynamic C** [110], el cual brinda una interfaz cómoda de programación, compilación, grabación y *debugging*. También, este entorno permite la implementación de características muy importantes a ser utilizadas en este trabajo, como por ejemplo, *stack* TCP/IP, servidor web, y simulación de multitarea (*co-states*).
- Dimensiones: 41 mm × 58 mm × 22 mm.

Una imagen del módulo Rabbit RCM 2200 se observa en la figura 4.3.5:



Figura 4.3.5: Módulo Rabbit RCM 2200. En la capa inferior, se pueden observar los pines de entrada/salida.

Cabe hacer una mención a dos características muy importantes de este módulo, las cuales han sido explotadas en este trabajo: servidor web y multitarea cooperativo o *co-states*.

Servidor-web:

Esta capacidad da la ventaja de disponer de una interfaz gráfica hacia el *hardware* por medio de un código HTML almacenado en el microcontrolador. Esto representa una gran ventaja para la implementación, ya que se puede interactuar con el microcontrolador desde un navegador web, accediendo a la misma por medio de su dirección IP. Además, es posible vincular las variables del *firmware* programado en Dynamic C, con el código HTML, ya que ambos son almacenados en la memoria del microcontrolador. Esto da la posibilidad de disparar procesos, o controlar el flujo de ejecución del *firmware* principal desde los controles de una interfaz gráfica accedida remotamente desde un navegador.

En este trabajo, se programaron dos interfaces gráficas, en función del grado de acceso que se desee tener a los dispositivos: *modo administrador* y *modo usuario*. La primera permite controlar manualmente cada uno de los relés del sistema, mientras que la segunda, se accede a los mismos por medio de métodos automáticos, como la inicialización y finalización del equipo para la toma de datos. En el capítulo 5, sección 5.3.2 se dará un detalle de esta implementación.

Multitarea cooperativo:

La familia de microcontroladores Rabbit, poseen la característica de funcionar en un modo de multitarea cooperativo. El funcionamiento de esto es por medio de la definición de diferentes piezas de código (*co-states*), las cuales, ceden el control unas a otras durante sus tiempos muertos o ante la invocación de comandos específicos. De esta manera, los

diferentes *co-states* se multiplexan entre sí pudiendo atender los diferentes requerimientos que el *firmware* necesite. En la figura 4.3.6 se muestra un diagrama esquemático del funcionamiento de los *co-states*.

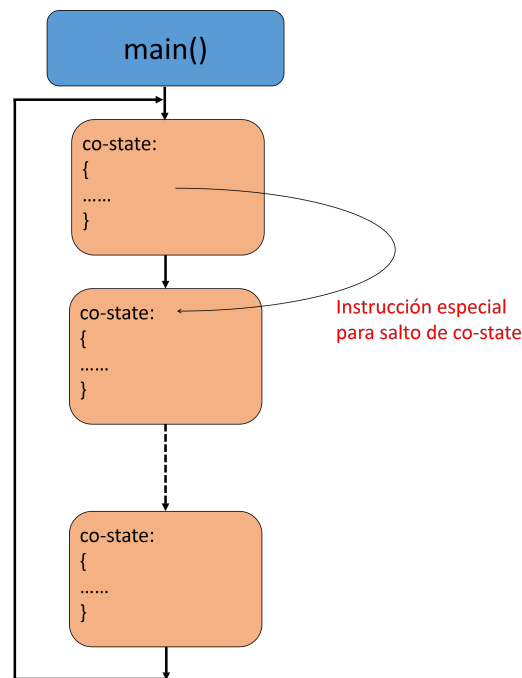


Figura 4.3.6: Diagrama esquemático del funcionamiento de los *co-states*.

El paso de un *co-state* a otro puede ser debido a la finalización del mismo, o por medio de instrucciones especiales. Estas instrucciones pueden ser, por ejemplo, la espera de la recepción de datos por medio de la interface Ethernet, el puerto serie, o directamente invocando una instrucción de salto de *co-states*.

La implementación de estos estados cooperativos es el eje central del *firmware* de este trabajo, permitiendo la organización de las diferentes tareas a realizar y dotando al código de un mayor orden y claridad para su *debugging*. En el capítulo 5, sección 5.3.1 se dará un detalle de esta implementación.

4.3.3.2. Interfaces de control del microcontrolador

Debido a la limitada cantidad de pines del microcontrolador, y con la idea de poder realizar un sistema modular y con capacidad de expansión, se han realizado una electrónica de interfaces entre el microcontrolador y sus salidas (relés), entradas (sensores y fines de carrera) y motores. Esto permite una mejor eficiencia en el uso de sus pines, como también una mejor aislación eléctrica por medio de optoacopladores.

En esta sección se describirán los diferentes requisitos de estas interfaces, junto con los criterios adoptados para su diseño y posterior implementación.

Requerimientos de las interfaces de control

Los puntos más importantes a cumplir por las diferentes interfaces son los siguientes:

- Interfaz de control para señales de entrada: es la encargada de recibir la información de los diferentes sensores y fines de carrera encargados de entregar información del sistema. En su diseño, se busca economizar pines del microcontrolador, para poder contar con ellos en caso de futuras actualizaciones.

- Interfaz de control para señales de salida: es la encargada de accionar los relés que habilitan/deshabilitan a los diferentes dispositivos. Debe utilizar la menor cantidad de pines del microcontrolador, pudiendo direccionar la mayor cantidad de relés posibles. Estos cumplen la función de controlar (**ON/OFF**) los diferentes dispositivos, por lo que deberán estar optoacoplados para una mayor seguridad.
- Interfaz de control de motores: por simplicidad de diseño y operación, se buscó un control unificado tanto para los motores de escaneo como para los de auto-alineación de los telescopios. Se definió utilizar motores del tipo paso-a-paso, motivado principalmente por su simplicidad de control digital desde el microcontrolador.

Se procederá a continuación a describir el diseño de las soluciones planteadas para las diferentes interfaces.

Diseño de las interfaces de control

Toda la electrónica de control instalada en el lidar tiene como objetivo principal ejecutar los comandos que ordena el operador desde la PC de Control. Esta electrónica, por medio del microcontrolador, está capacitada para recibir los comandos vía Ethernet y ejecutarlos convenientemente por medio de estas interfaces. Para esto, debe tener acceso a los dispositivos que integran el lidar, para conectarlos a la red eléctrica (por medio de los relés) o leer su estado (por medio de los sensores). Por lo tanto, la principal función del microcontrolador es la de traducir los mensajes recibidos por medio de la interfaz Ethernet y operar convenientemente en función de los mismos.

En base a las características listadas en las secciones anteriores, se muestra a continuación un diagrama en bloques general de la electrónica de control.

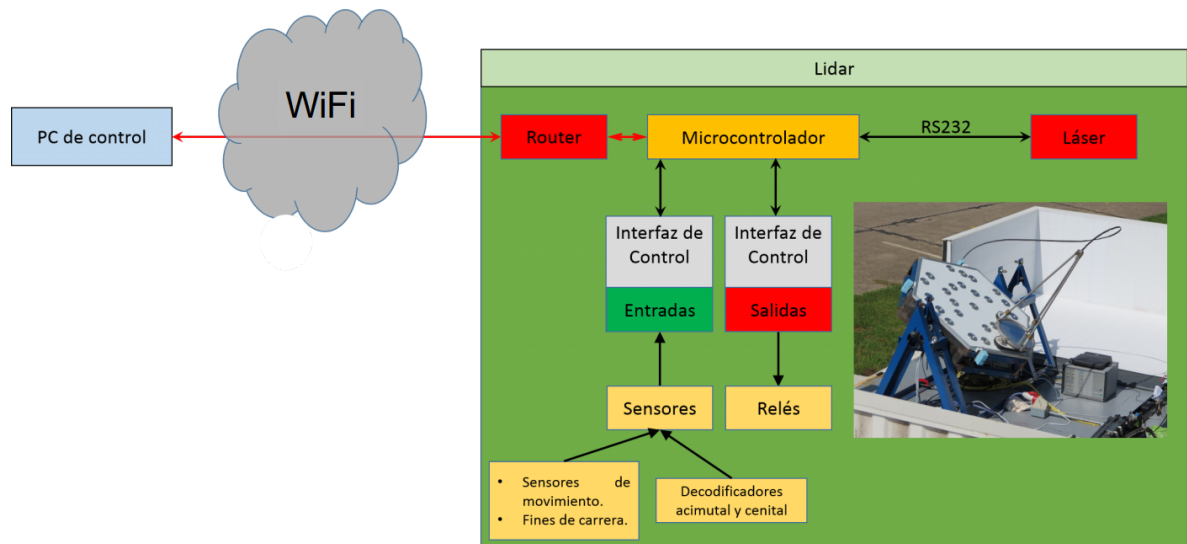


Figura 4.3.7: Diagrama en bloques general de las conexiones del microcontrolador con los demás dispositivos.

Estas interfaces fueron diseñadas en base a *shift-registers* serie-paralelo para las salidas, y paralelo-serie para las entradas. De esta manera solo son necesarios 3 pines del microcontrolador para controlar cada una de las interfaces: datos, *clock* y *latch*. Esta implementación resulta muy simple, tanto en la programación como en la construcción de su electrónica, siendo todos sus componentes accesibles en el mercado local.

Se desarrollará en las siguientes secciones el diseño de las mismas.

4.3.3.3. Interfaz de control para señales de entrada. Lectura de sensores

Por medio de esta electrónica, el sistema adquiere la información del estado del *hardware*, siendo sus valores (combinados con el estado de los relés) el motivo de la mayoría de las toma de decisiones automáticas por parte del microcontrolador.

La misma se ha implementado por medio de registros desplazamiento paralelo-serie, logrando con 2 líneas de control (*latch* y *clock*) poder ingresar toda la información en serie por un tercer pin (datos). Se muestra en la figura 4.3.8 un diagrama en bloques general la esta interfaz.

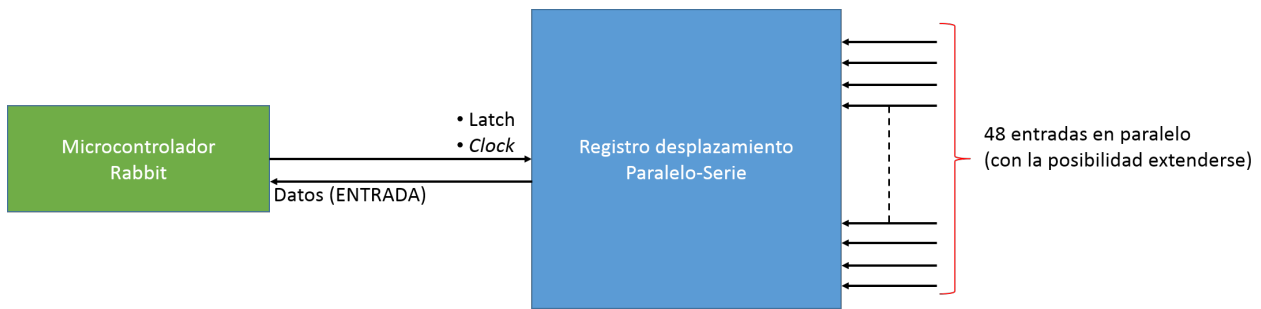


Figura 4.3.8: Diagrama en bloques de la electrónica de interfaces de entradas.

Esto fue implementado con 6 registros desplazamiento **74HC165** conectados en serie, logrando controlar 48 entradas (con posibilidades de extensión) con solo 3 pines del microcontrolador. Un esquemático de esta implementación se observa en la figura 4.3.9, donde también se observa que los 8 bits menos significativos se encuentran optoacoplados por medio de 2 chips ILQ1 [111].

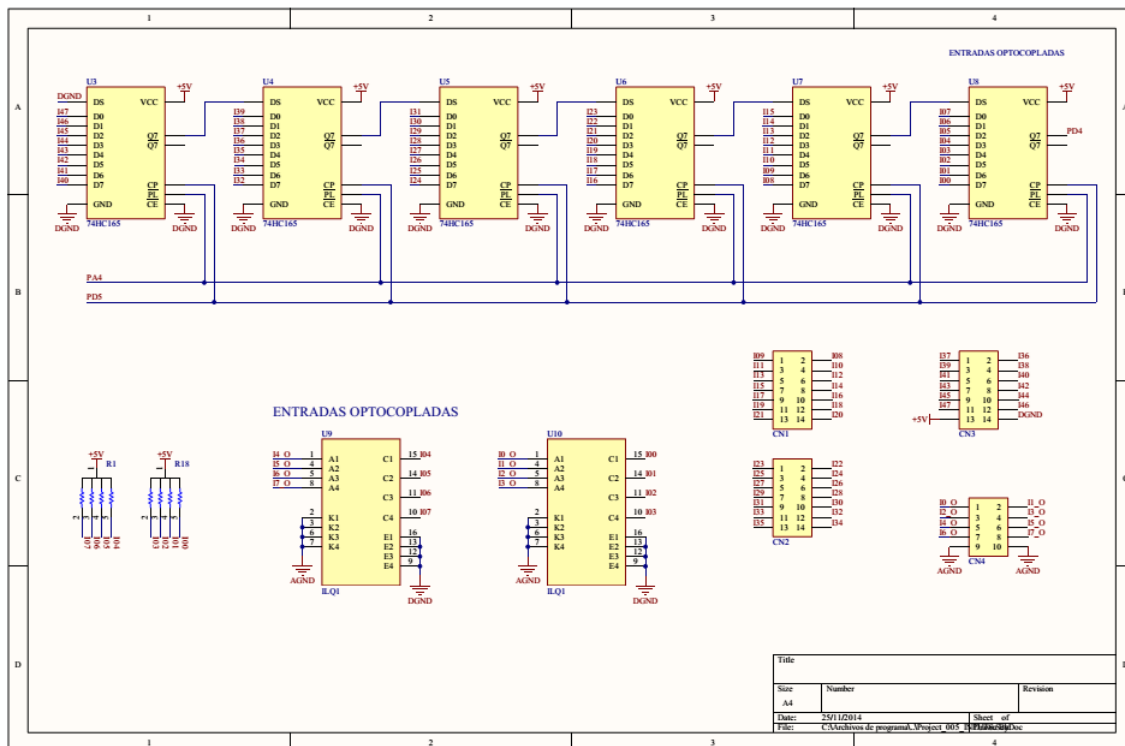


Figura 4.3.9: Diagrama esquemático de la electrónica de entradas.

En estas entradas, se conectan los sensores de movimiento, fines de carrera y las salidas de los *encoders* de los motores de escaneo (cenital y acimutal). En cuanto al orden del conexionado, se ubican en los 8 bits menos significativos los fines de carrera y sensores de movimiento, conectados en el orden que se describe en el cuadro 4.3.2.

8 bits menos significativos	
Pin	Control
0	Fin de carrera para el contenedor abierto.
1	Fin de carrera para el contenedor cerrado.
2	Alarma para abrir el contenedor.
3	Alarma para cerrar contenedor.
4	Sensor HOME acimut.
5	Sensor HOME cenit.
6	Sensor alerta cenit.
7	Sensor alerta acimut.

Cuadro 4.3.2: Conexión de los diferentes fines de carrera y sensores de movimiento a la interfaz de entrada.

Las alarmas para abrir y cerrar el contenedor son generadas por sensores de movimiento ubicados convenientemente. En caso de detectar presencia humana durante el proceso de apertura o cierre del contenedor, se suspende el procedimiento hasta que las señales provenientes de los sensores desaparezcan.

Los fines de carrera se encuentran instalados en los extremos del recorrido de los cilindros de apertura y cierre del contenedor, obteniendo información acerca del estado del mismo (abierto/cerrado). También, se han instalado sensores magnéticos en la plataforma de escaneo, los cuales marcan la posición cenital/acimutal del “HOME” del sistema, como también límites máximos de recorrido de ambos movimientos. Estos, actúan como refuerzo a la información de la posición que se obtiene por medio de los *encoders*, instalados en cada eje del movimiento acimutal y cenital. Los mismos son de la empresa Kubler, modelo 8.5852.1235.G141, los cuales entregan la posición absoluta con una resolución de 14 bits, con 0.021972° /cuenta. Esta información es leída por el microcontrolador por medio de su interfaz de entrada, estando conectada a continuación de los 8 bits menos significativos anteriormente detallados (cuadro 4.3.2). En los siguientes 14 bits se encuentra la coordenada cenital, seguido de los bits correspondientes al acimutal. El dato entregado por los *encoders* es en código de Grey, el cual es transformado a decimal en el firmware del microcontrolador. Esta información es de gran importancia para el análisis de datos posterior, por lo que es almacenada en el *header* de cada archivo de adquisición.

4.3.3.4. Interfaz de control para señales de salida. Control de relés

Esta electrónica es la encargada del accionamiento **ON/OFF** de los relés para diferentes dispositivos, los cuales se resumen en la siguiente lista:

- Láser.

- Equipo de refrigeración del láser.
- Electrónica de adquisición y fuentes de los fotomultiplicadores.
- Bomba de aceite de los cilindros de apertura del contenedor-cúpula.
- Apertura/cierre del contenedor-cúpula (cada acción requiere de un relé por separado).
- Iluminación del contenedor.

Análogamente con la interfaz de entradas, y debido a la cantidad de relés a controlar, se realizó una electrónica serie-paralelo. De esta manera, con solo 3 pines del microcontrolador: datos, reloj y *latch*, podemos manejar todas las salidas que se requieran para este proyecto, incluyendo la capacidad de expansión en caso de futuras actualizaciones. En la siguiente figura (4.3.10) se observa un diagrama del concepto aplicado.

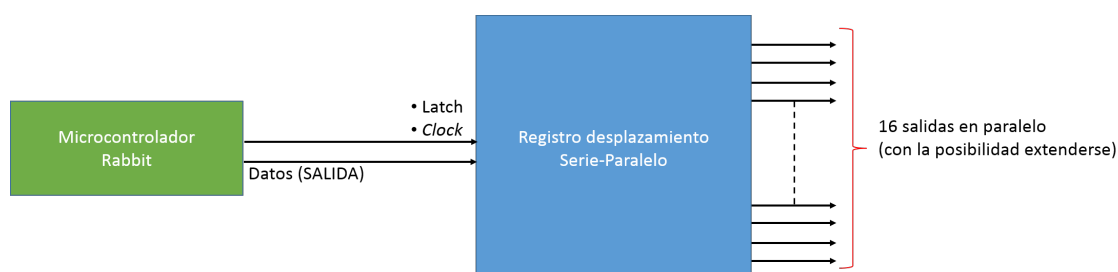


Figura 4.3.10: Diagrama en bloques de la electrónica de interfaces de salida.

Para esta implementación, se han utilizado 4 registro-desplazamiento **74HC595**, logrando 16 salidas (con capacidad de extensión), de las cuales sólo se utilizan 6. En la figura 4.3.11 se muestra el diagrama esquemático de esta interfaz.

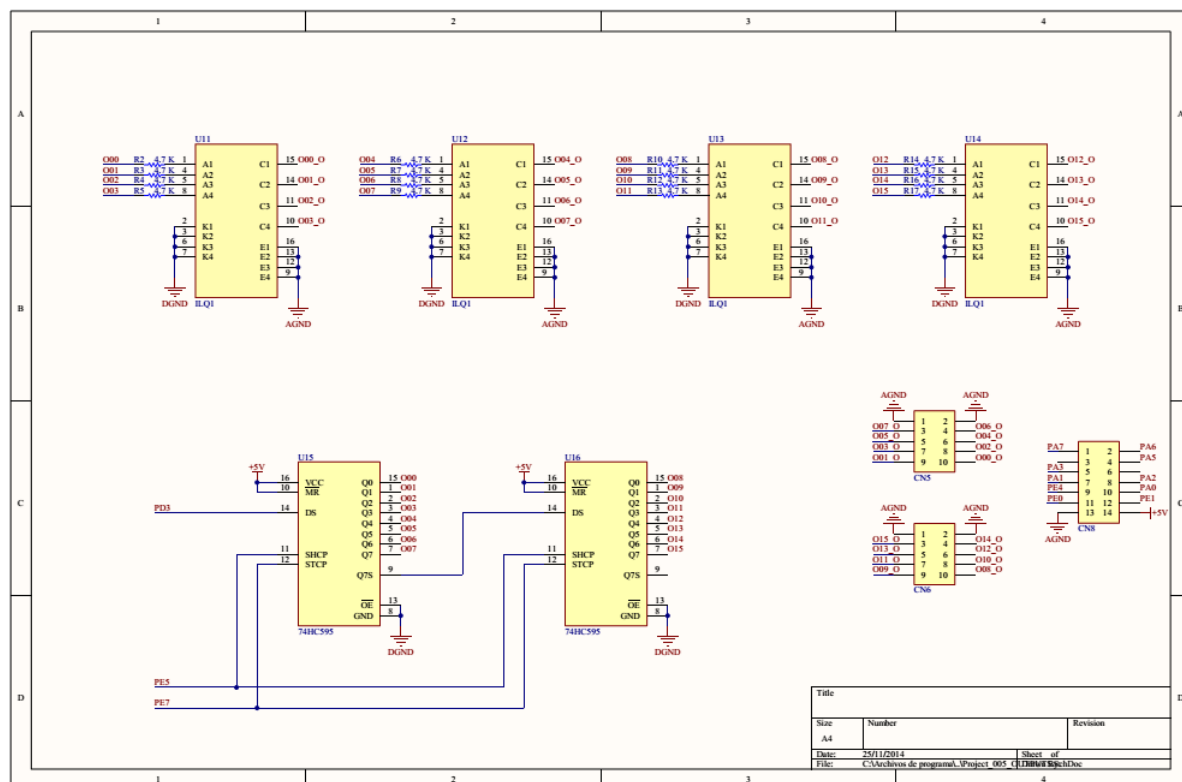


Figura 4.3.11: Diagrama esquemático de la electrónica de salida.

Para una mayor seguridad, todas estas salidas se encuentran optoacopladas por medio de 4 chips **ILQ1** ([111]), como se puede observar en la parte superior del esquemático.

En el cuadro 4.3.3 se listan el orden de conexión de cada relé correspondiente a cada dispositivo:

Conexión de los 8 bits menos significativos	
Pin	Dispositivo
0	Relé bomba de cilindros para apertura/cierre del contenedor.
1	Relé de válvula de cilindro de apertura del contenedor.
2	Relé de válvula de cilindro de cierre del contenedor.
3	Relé de refrigerador de agua del láser.
4	Relé del láser.
5	Relé de luz del contenedor.
6	Relé de placa de adquisición y fuente de fotomultiplicadores.
7	sin uso.

Cuadro 4.3.3: Conexión de los pines del microcontrolador con los relés de cada dispositivo.

El accionamiento ordenado de cada uno de estos relés está a cargo del *software* de control y el *firmware* del microcontrolador, los cuales trabajan de manera colaborativa, mediante mensajes de control. La descripción detallada de estos algoritmos serán desarrollados en el capítulo 5.

Tanto la lógica del *shift-register* de entrada como la de salida se ubica en la misma placa que alberga al microcontrolador. Esta placa se puede observar en la figura 4.3.12.

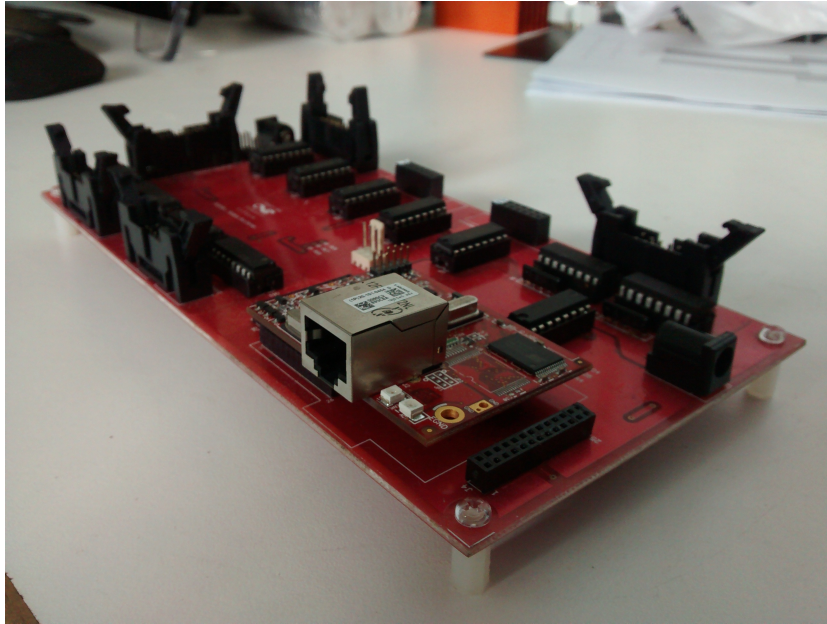


Figura 4.3.12: Placa de la electrónica de control. Esta placa contiene al módulo del microcontrolador como a las interfaces de entrada y salidas descritas.

4.3.3.5. Interface de control de los motores paso-a-paso

En base a los requisitos de la electrónica de control de motores 4.3.3.2, se realizó un control unificado, tanto para los motores de auto-alineación de los telescopios, como para los motores de escaneo, ya que todos son del tipo paso-a-paso. Esto otorga la ventaja de poder utilizar las mismas señales de control hacia la interface de control: **habilitación, dirección y paso**. Las señales de **dirección** y **paso** son las mismas para todos los *drivers*, mientras que la señal de **habilitación** para los 14 motores (12 de auto-alineación y 2 de escaneo) son generadas por medio de un demultiplexor **74HC154**. Para esto, se necesitó de 4 líneas más del microcontrolador, las cuales, generan la dirección del motor en el demultiplexor, siendo el encargado de generar las 14 señales de **habilitación**, para cada *driver*. En la figura 4.3.13, se observa el esquemático de esta interface de control.

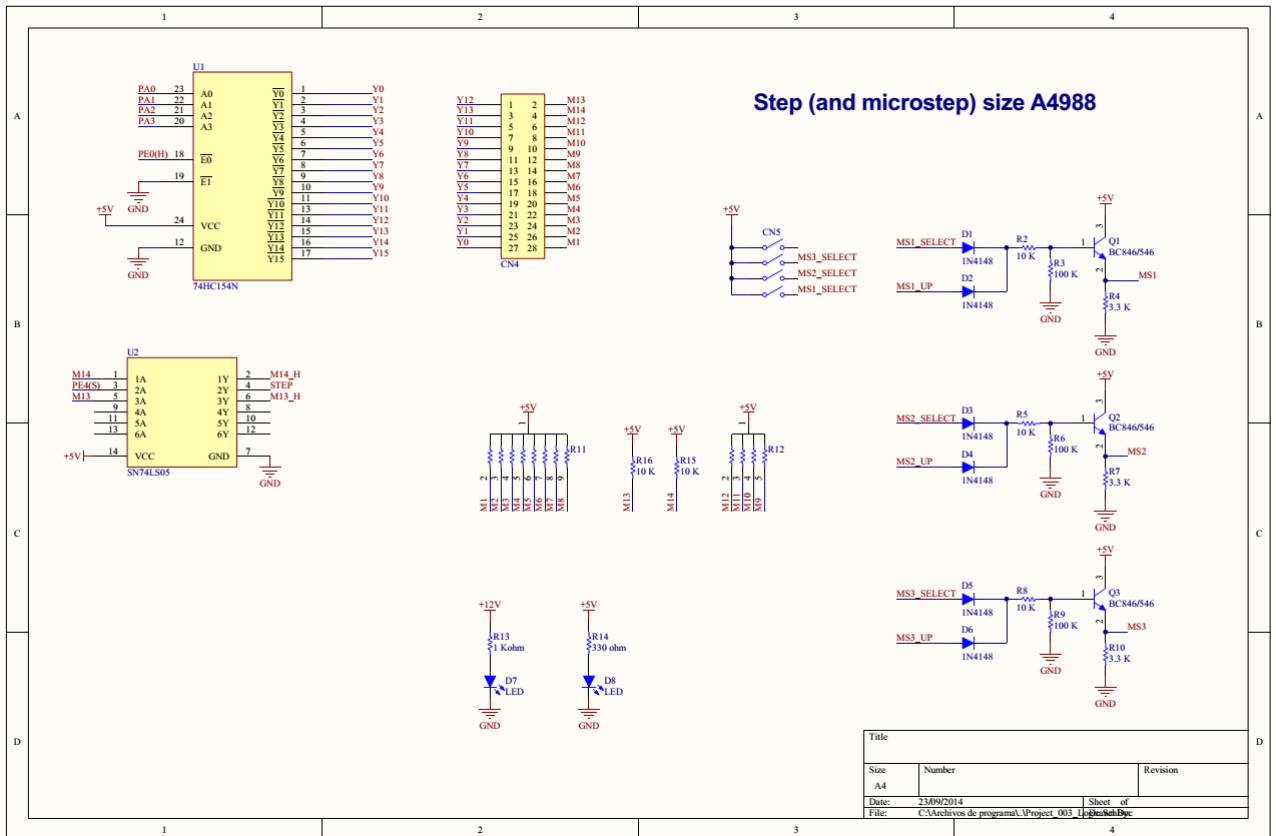


Figura 4.3.13: Diagrama esquemático de la electrónica de control de los motores paso-a-paso.

Las señales de **paso** y **habilitación** pasan a través de un **buffer 74LS05**. Los 4 pines del microcontrolador utilizados para la generación de la dirección son **PA0-PA3**, y los valores para direccionar los diferentes motores se listan en el cuadro 4.3.4.

Dirección PA0-PA3	Motor
0-11	Motores de telescopios para auto-alineación
12	Motor de escaneo cenital
13	Motor de escaneo acimutal

Cuadro 4.3.4: Conexionado de pines para el direccionamiento de los motores del lidar.

Estos 4 pines ingresan al demultiplexor y generan la señal de habilitación de cada uno de los 14 diferentes motores paso-a-paso. Por lo tanto, con un total de 6 pines del microcontrolador (4 para las direcciones, más dirección y paso) se logra controlar los 14 motores paso-a-paso: 2 encargados del escaneo acimutal y cenital y 12 encargados de la auto-alineación de los telescopios. La figura 4.3.14 muestra una foto de esta placa.

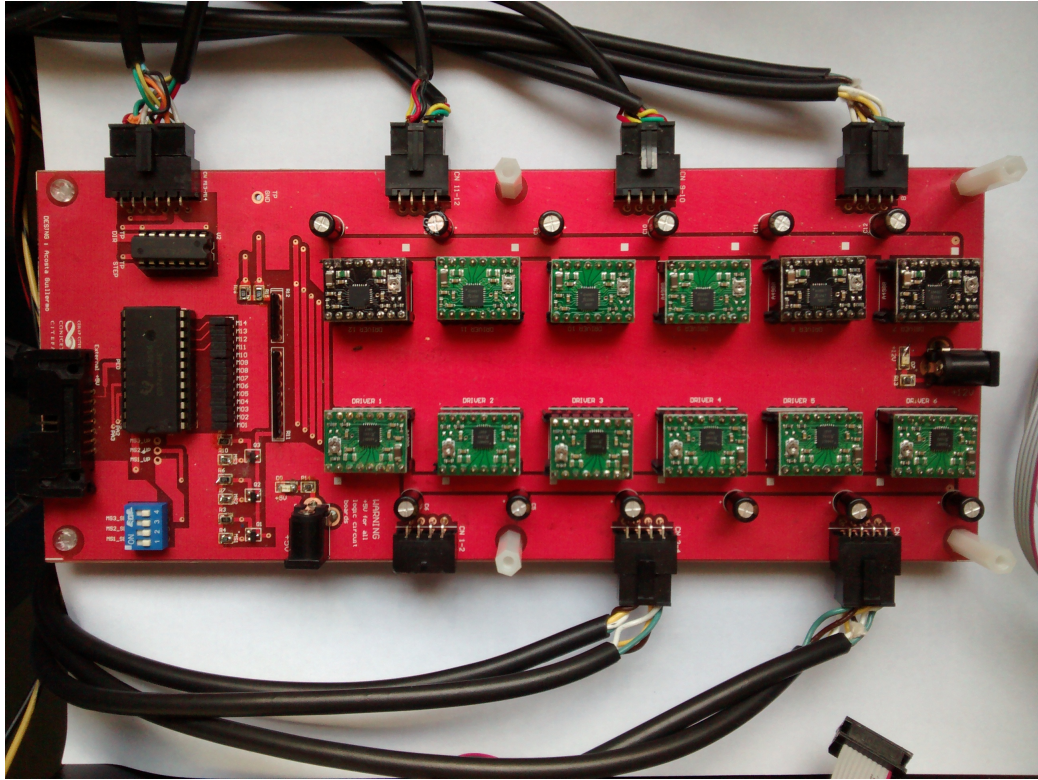


Figura 4.3.14: Foto de la electrónica de control de los motores paso-a-paso.

Las 12 placas que se observan (verdes y negras), corresponden a los *drivers* de los motores de auto-alineación. En la parte superior derecha (conector más grande), se encuentra el conector correspondiente a los *drivers* de los motores de escaneo.

4.4. Conclusiones

Se describió en este capítulo las características de la mecánica y la electrónica del lidar Raman multiángulo, siguiendo las especificaciones impuestas en el capítulo 3. Este desarrollo implicó una interacción muy activa con otros grupos de trabajo, principalmente en las áreas de mecánica y óptica. En todo este proceso, tuve un rol muy activo en el seguimiento de cada trabajo, como de las modificaciones que se tomaron para el mejoramiento de cada pieza.

Se ha logrado una mecánica que cumpla con los requerimientos impuestos, destacando principalmente el sistema de escaneo acimutal-cenital, como también el soporte y sistema de auto-alineación de cada uno de los telescopios.

Con respecto a la electrónica, se ha realizado con un diseño simple y modular, capaz de controlar el *hardware* a distancia. Este sistema puede ser adaptable a otros lidars que requieran un control remoto de sus dispositivos, como también, del sensado de sus parámetros relevantes. Esta electrónica de control es factible de expansión en caso de futuros cambios, siendo además realizada con componentes de fácil recambio en el país.

Todos estos trabajos han permitido un gran aprendizaje para la División Lidar, ya que se debió innovar en nuevos procedimientos a los ya conocidos, logrando nuevas técnicas para futuros desarrollos.

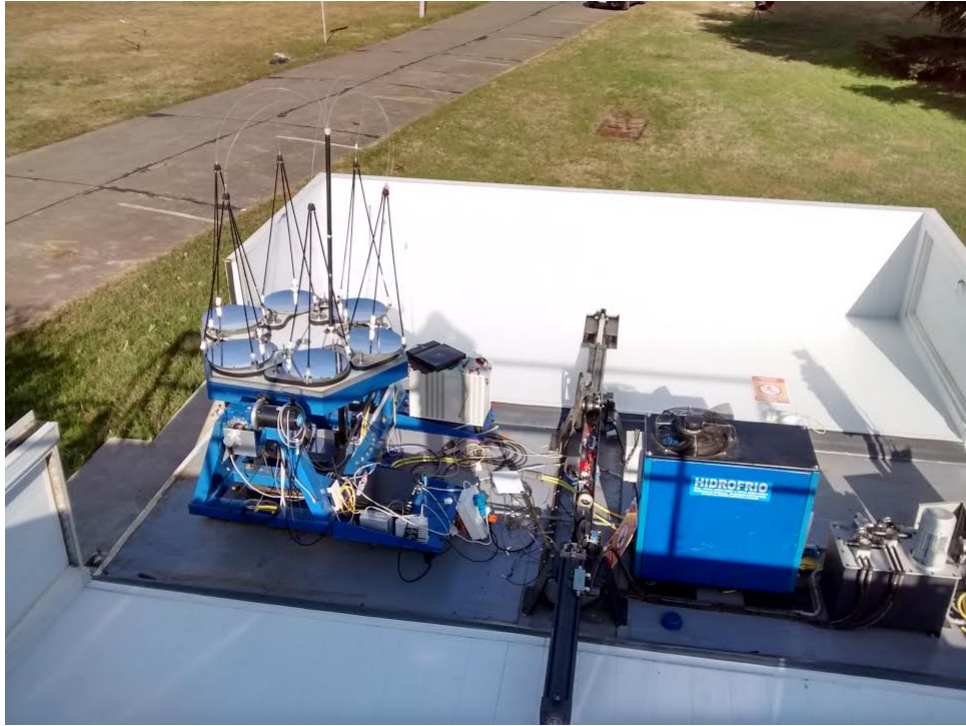


Figura 4.4.1: Lidar Raman multiángulo.

Todo este trabajo se ha podido realizar gracias al financiamiento por parte de la fundación FUNC (Fundación Universidad Nacional de Cuyo), y por medio del proyecto PIDDEF 18/11 denominado "Exploración del espacio aéreo con técnica láser y sensores de radiación pasivos", perteneciente al Ministerio de Defensa.

Capítulo 5

Software de control, automatización y adquisición

5.1. Introducción

Desde la incorporación de la División Lidar del CEILAP en la colaboración Argentina del Observatorio Pierre Auger, he tenido la oportunidad de participar de 4 períodos de medición (*shift*) del Observatorio. Esta experiencia me ha permitido aprender acerca de las características y requerimientos que debe cumplir un *software* de operación en un gran Observatorio, las cuales difieren mucho de la rutina de operación que se realiza en un laboratorio especializado en la técnica, como en la División Lidar.

Debido a la extensión física que ocupan los Observatorios en los que está enmarcada esta tesis (Auger $\sim 3000\text{ km}^2$, CTA $\sim 10\text{ km}^2$), surge la necesidad del control y operación de los equipos de manera remota. Esto es llevado a cabo desde un centro de control capacitado para la toma de datos de todos los dispositivos. Otra característica a tener en cuenta, es que estos equipos serán operados por miembros de la colaboración que generalmente no poseen un conocimiento *a-priori* de la operación de los lidares, por lo que se requiere de un alto grado de automatización y operación simple. Uno de los principales trabajos de esta tesis está basado en la necesidad de asistir a estos requerimientos. Es por esto que se desarrolló un sistema control y automatización de los procedimientos encargados de la toma de datos y del control del *hardware* de manera remota y automática, las cuales requieren una intervención mínima del operador. Este sistema consta de un *software* que se ejecuta en la PC de Control el cual, trabaja de manera colaborativa con el *firmware* del microcontrolador ubicado en el lidar. Este microcontrolador es el encargado de ejecutar las acciones enviadas desde la PC de Control, como también, mantenerla informada del estado del lidar por medio de diferentes variables.

Una característica importante en el desarrollo del *software* es la modularidad del mismo. Esto implica la realización de diferentes procesos, cada uno con una tarea en particular y trabajando de manera colaborativa. Para esto, se comunican entre sí por medio de un protocolo de mensajes pensado y realizado para este trabajo. Esto da la posibilidad de ser adaptable a otro sistema lidar que desee un control de manera remota o local, y con el grado de automatización logrado con este equipo. Otro trabajo de automatización realizado en esta tesis es un sistema de auto-alineación de los telescopios, el cual será explicado detalladamente en el capítulo 6.

A lo largo de este capítulo se describirá el *software* que cumpla con las características generales del lidar enunciadas en el capítulo 1 sección 1.4, centrándose en los puntos 5 y 6, los cuales hacen especial referencia a la operabilidad del lidar. Se describirán los diferentes procesos desarrollados (incluido el *firmware* del microcontrolador), los cuales, se encargan de la automatización y control del lidar. La descripción detallada del protocolo de mensajes, el cual permite una correcta coordinación de los diferentes procedimientos será realizada en el apéndice B. Finalmente, se dará una descripción de la ejecución automática los procesos para un correcto funcionamiento durante una toma de datos.

5.2. Organización del *software/firmware* del sistema

El desarrollo del *software* es un punto importante en este trabajo de tesis, ya que se han programado todos los procesos encargados de la operación, control y automatización del sistema. Esto contempla la administración de los diferentes dispositivos para la toma de datos, ya sea de manera manual o automática. Para esto, se desarrollaron los procesos necesarios a ejecutarse en la PC de Control, los cuales, se comunican con los diferentes dispositivos ubicados en el lidar y administrando la correcta operación de los mismos. Del

lado del lidar, respondiendo a las órdenes de la PC, se encuentra el microcontrolador, el cual, permite la ejecución de los principales comandos, referidos principalmente a: control de relés, lectura de sensores y comandos hacia/desde el láser. Todas estas tareas realizadas por el microcontrolador son reportadas constantemente a la PC de Control para tener un conocimiento completo del estado del lidar multiángulo. Un resumen de este sistema se reportó en [112] [113], donde se enunciaron los primeros esquemas de la organización del *software/firmware* de este trabajo.

Debido al alto grado de interacción entre el *software* y el *hardware*, es necesario a modo de introducción, una descripción general acerca de la interconexión de los diferentes dispositivos del lidar en función de sus interfaces. Esto fue descrito en la sección 4.3 del capítulo 4, en el cual, por medio de la figura 4.3.1 se describe la disposición esquemática de la vinculación entre la PC de Control con los diferentes dispositivos del lidar. A modo de introducción, y para una mayor claridad, se repite dicha figura:

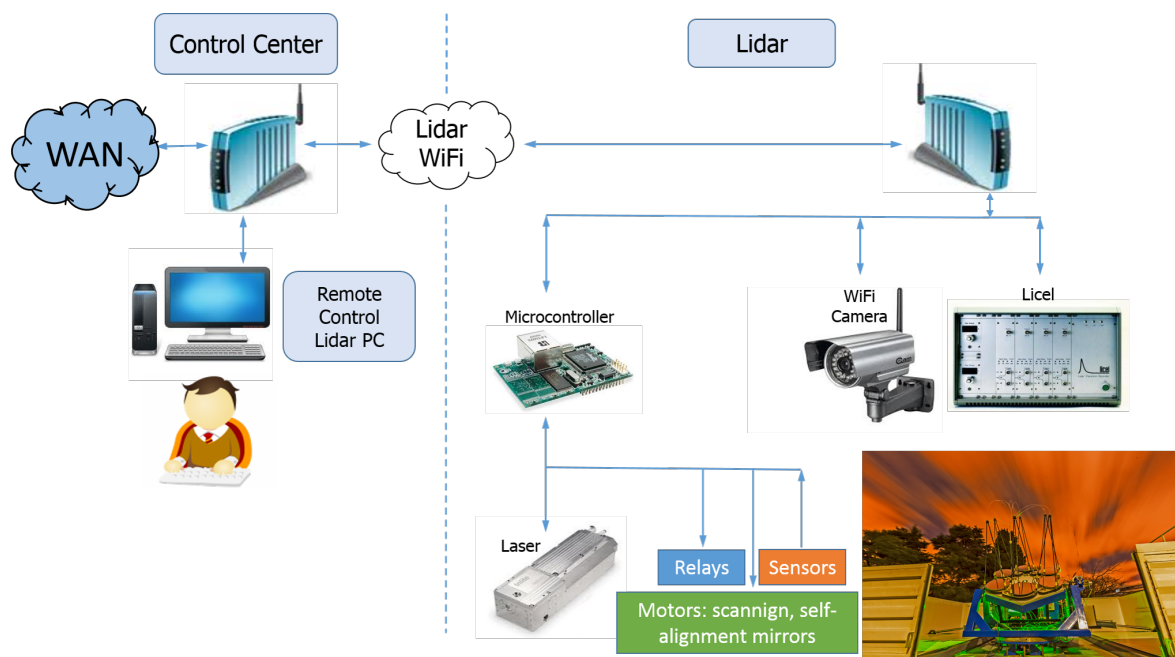


Figura 5.2.1: Disposición esquemática del sistema, donde se observa la vinculación entre la PC de Control y los diferentes dispositivos en el lidar.

La comunicación entre la PC de Control y el lidar está formada por enlace WiFi, formando una red interna entre los diferentes dispositivos IP que forman el lidar. Estos son: PC de Control, módulo microcontrolador RCM2200, cámara WiFi y la electrónica de adquisición. El resto de los dispositivos (relés, sensores, motores y láser) serán controlados a través del microcontrolador, el cual, tiene acceso mediante las interfaces correspondientes: comunicación RS232 para el láser, y una electrónica realizada *ad-hoc* para acceder a los relés y sensores (ver capítulo 4, sección 4.3.3.2).

Un resumen de las tareas a realizar por parte de la PC de Control como del microcontrolador se describen a continuación:

PC de Control: Existen 3 tareas principales que deben realizarse en la PC de Control: **adquisición, visualización de señales y control de dispositivos**. Cada una de estas tareas son realizadas por diferentes procesos, logrando un desarrollo ordenado y modular. Esto facilita la implementación de actualizaciones y una depuración de errores

más efectiva. Cada uno de estos procesos se comunican entre sí por medio de diferentes métodos IPC (Inter Process Communication), como también, con el microcontrolador ubicado en el lidar. Como se observa en la figura 5.2.1, tanto la cámara WiFi como la electrónica de adquisición (Licel) son accedidos remotamente desde la PC sin la intervención del microcontrolador. Para esto, el proceso encargado de la adquisición de datos se comunica directamente con el Licel a través del vínculo WiFi. De manera similar, a la imagen de la *web-cam* se accede desde la PC de Control, pero utilizando un navegador web. Esta cámara, dota al operador de un acceso visual al equipo, como medio alternativo de chequeo ante cualquier problema que pueda surgir, o simplemente para asegurarse de que todo funcione correctamente.

Microcontrolador: La tarea principal de este dispositivo es de responder a las órdenes enviadas por la PC de Control. Además, y de manera automática, controla constantemente el estado de los sensores y relés, verificando que sus valores sean coherentes y no posean combinaciones prohibidas. En caso de ocurrir alguno de estos estados, el microcontrolador solo se encargará de detener la acción en curso para proteger la integridad del equipamiento (y de algún eventual operador en caso de mantenimiento). Luego, la secuencia para la recomposición del procedimiento que estaba en curso, es realizada desde la PC de Control por el *software* correspondiente.

Como se describió en el capítulo 4, sub-sección 4.3.3.1, el módulo **RCM2200** posee la capacidad de correr un *web-server*. Ésta es una característica que facilita mucho el acceso al microcontrolador por medio de una interfaz gráfica, y en un lenguaje de rápido desarrollo, como es el HTML. En este trabajo, se ha utilizado esta cualidad para el acceso y control del *hardware*, ya que se necesitan varios controles para acceder a cada uno de ellos.

En la figura 5.2.2 se observa la interacción de los diferentes procesos en la PC de Control, y sus vínculos con el *firmware* y *web-server* del microcontrolador.

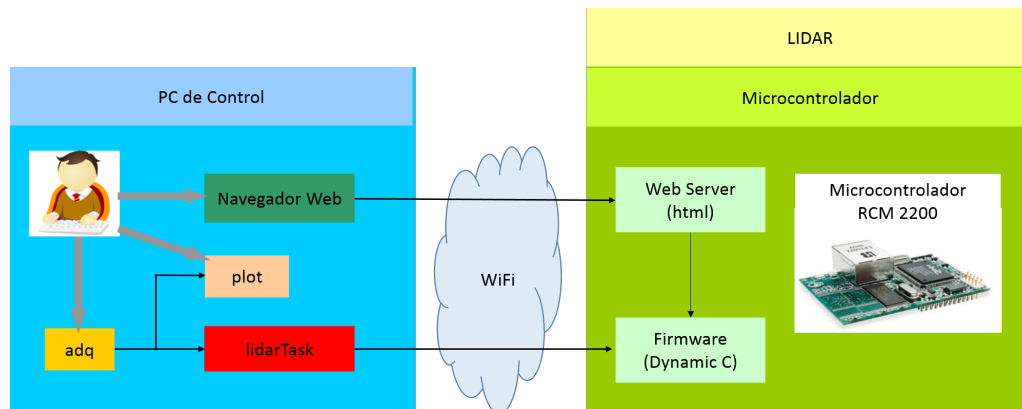


Figura 5.2.2: Distribución de los diferentes procesos en la PC de Control y su vinculación con el *firmware* y *web-server* del lado del microcontrolador.

Se observa en esta última figura los nombres de los diferentes procesos de la PC de Control en base a las diferentes tareas a realizar, y su vinculación con el microcontrolador. A excepción del Navegador Web, todos los demás fueron programados para este trabajo.

Como su nombre lo indica, el proceso **adq** es el encargado de administrar la adquisición, comunicándose directamente con la electrónica de digitalización de señales (Licel). Este proceso obtiene la información del estado del lidar por medio de **lidarTask**, el cual, se encarga de administrar sus tareas, siendo además el encargado de los procedimientos

automáticos como la autoalineación de los telescopios y el escaneo del sistema. También, interroga al microcontrolador regularmente para conocer el estado de todos los relés, sensores y el láser, almacenando su estado en diferentes variables para compartirlo con **adq**. El proceso **plot** se encarga de la visualización de las señales, el cual, solo se comunica con **adq** para recibir el *path* del archivo con las señales recién adquiridas. Por último, desde el Navegador Web, ingresando la dirección IP del microcontrolador, se podrá acceder al control de los diferentes dispositivos que forman parte del lidar. En la figura 5.2.2, las flechas que salen del operador hacia los procesos indican que éstos poseen interfaz gráfica para el control y operación de los mismos.

Del lado del módulo microcontrolador RCM2200, se observa que además del *firmware* (programado en DynamicC) alberga a las páginas web para ser accedidas mediante un navegador web desde la PC de Control. Estos dos códigos comparten variables, pudiendo funcionar de manera colaborativa. Desde la interface web, se tiene acceso de manera gráfica y simple a los controles individuales de cada relé, como también, de un acceso visual del estado de cada sensor. También, como se describirá más adelante, es posible disparar los procesos automáticos de inicialización/finalización del lidar.

Todo este sistema, debe permitir el control manual y automático de las diferentes tareas involucradas en la toma de datos. También, tener la capacidad de solucionar errores de manera automática, generando las señales de alarma correspondientes para la notificación e intervención del operador (en caso de ser necesario). Todo esto debe ser coordinado por los diferentes procesos que corren en la PC de Control, y en constante comunicación con el microcontrolador ubicado en el lidar.

La PC de Control posee un CPU Intel Core II Cuad, 2,4 GHz, con 4 Gb de memoria RAM. El disco rígido es de 500 Gb, pero gracias a que se encuentra conectada en red (ver figura 5.2.1), la base de datos de las señales adquiridas se almacenarán en servidores externos, dejando solo en esta PC los datos generados durante la última semana. Este movimiento de información es realizada por medio de software externo dedicado a este tipo de sincronización. El sistema operativo es GNU/Linux, distribución Ubuntu 14.04.1 LTS. La realización del código sobre este sistema operativo ofrece una gran cantidad de recursos para este tipo de desarrollo, existiendo además una gran comunidad mundial que brinda el soporte necesario. Todo el software del lidar se programó en lenguaje C/C++.

Para la interfaz gráfica y el análisis de datos, se utilizó el paquete de librerías ROOT [114]. Estas librerías fueron desarrolladas por el **CERN** para el análisis de datos del acelerador de partículas **LHC**. Las mismas poseen gran cantidad de herramientas para el análisis y procesamiento de grandes volúmenes de datos, así como también librerías para la realización de interfaces de usuario o funciones matemáticas complejas.

En cuanto a la configuración de la red, la PC de Control es seteada en **DHCP**, reservando su dirección desde el *router* al cual se encuentra conectada por medio de su **MAC-Address**. En el caso de la electrónica de adquisición y el microcontrolador, son configuradas manualmente en cada dispositivo. En cuanto a la seguridad de la red, se ha configurado un filtro por **MAC-Address**, permitiendo a sólo los dispositivos intervinientes en la operación del lidar poder conectarse a la red.

En las secciones siguientes, se realizará una descripción detallada de los procesos que corren del lado del operador y de la programación del *firmware*. Se describirá también el protocolo de mensajes entre ellos para el funcionamiento sincronizado del sistema.

5.3. Tareas del microcontrolador

Como se apuntó en la sección anterior, la principal tarea del microcontrolador es la de responder las órdenes enviadas desde la PC de Control, tomando decisiones solo en cuanto a medidas de seguridad. Las órdenes desde la PC pueden ser generadas a través del proceso **lidarTask** en diálogo mediante *sockets* TCP/IP con el *firmware*, o desde un navegador *web*, accediendo a la dirección IP del microcontrolador (ver figura 5.2.2). En este trabajo, el microcontrolador trabaja como *servidor*, mientras que el proceso **lidarTask** como *cliente*.

El operador del sistema, desde la PC de Control, interacciona con el microcontrolador a través de diferentes procesos. Del lado del lidar, el microcontrolador, realiza las siguientes tareas:

- Atiende los comandos del operador activados desde el servidor web.
- Atiende los comandos del operador recibidos vía TCP/IP, enviados desde el proceso **lidarTask**.
- Mantiene actualizado el estado de todas las variables que controlan al lidar, las cuales describen la situación en la que se encuentra (*variables de estado*).
- Verifica estados prohibidos de las *variables de estado*, tomando decisiones en caso de ser necesario (alarmas).

Como se desprende de estos 4 puntos, el microcontrolador tiene un rol pasivo, ya que principalmente atiende órdenes de la PC de Control, tomando sólo decisiones en caso de alarmas.

5.3.1. Descripción del Firmware

Debido a las diferentes tareas a realizar por el microcontrolador, y para una mejor eficiencia en la realización de las mismas, se hizo uso de su capacidad de multitarea que posee. Para esto, el lenguaje de programación **Dynamic C**, utilizado para el firmware del microcontrolador Rabbit, permite un modo multitarea basado en la multiplexación de diferentes estados (denominados *co-states*). Cada una de estas piezas de código, ante un tiempo muerto, cederán el control de su ejecución a otros *co-states*. Esto es llevado a cabo mediante instrucciones específicas, permitiendo separar diferentes trabajos para un mejor ordenamiento del código, efectivizando el manejo de las tareas y mejorando el rendimiento del código mediante la mejor administración de los tiempos muertos. Se programaron diferentes *co-states* los cuales permiten atender los requerimientos externos (provenientes de los procesos en la PC de Control) y mantener actualizadas las *variables de estado*, encargadas de describir al sistema. Estas variables, como se detallará en la sección 5.3.1.1, representan el estado del *hardware*, y son de vital importancia para el funcionamiento del lidar. Para cada una de ellas, existen funciones que las vinculan con el *hardware* que describen, manteniendo la coherencia entre el valor lógico de la variable y su representación física (señal eléctrica) en el dispositivo.

A modo de introducción, ya que serán desarrolladas con mayor detalle en el siguiente capítulo, se lista a continuación las *variables de estado*, junto con las funciones que las reflejan en el *hardware* correspondiente:

Variables de estado	Función	Descripción de la función
mbSensorStatus iDecAcimuthValue iDecZenithValue	GetSensorState()	Actualiza las variables en base al estado de los sensores, fines de carrera y <i>encoders</i> de los motores de escaneo.
mbRelayStatus	RefreshRelay()	Actualiza el estado de los relés en función de la variable.
iLaserStatus iLaserTemp	GetLaserState()	Se comunica con el láser para obtener el estado y la temperatura del cristal.
iLidarStatus	cgiShelterStart() cgiShelterShDwn() UpdateVarWeb()	Configuran la variable en base al estado general del sistema (UpdateVarWeb) o para disparar procesos automáticos en el lidar (cgiShelterStart() y cgiShelterShDwn()).

Cuadro 5.3.1: Variables de estado y las funciones que las modifican.

La implementación del núcleo del *firmware* fue realizada por medio de 11 *co-states*. A continuación se da un resumen de las tareas de cada uno:

- *co-state* 1: Atiende la página web. Esta acción se basa en ejecutar la función **http_handler()** (provista por **Dynamic C**), la cual, se encarga de capturar los eventos que se hayan sucedido en ella. En caso de haberse realizado alguna acción, esta función atiende el pedido en base al botón presionado. Para evitar perder algún evento en esta interface, **http_handler()** es llamada también desde otros *co-states*.
- *co-state* 2: Actualiza las *variables de estado* correspondiente al estado de los sensores y el láser llamando a las funciones: **GetSensorState()** y **GetLaserState()**. El llamado rutinario a estas funciones, las cuales son también llamadas desde otros *co-states*, hace que estas variables permanezcan actualizadas en todo momento.
- *co-state* 3: Espera la conexión con el proceso **lidarTask**, y en caso de existir una conexión activa, atiende sus comandos. En esta comunicación, el microcontrolador funciona como servidor, esperando los requerimientos del cliente para responder a sus pedidos. En caso de recibir algún comando, será almacenado en el buffer **bufferRxTx**. En la sección 5.3.1.2 se desarrollará el formato de estos comandos, los cuales, poseen un *header* que identifica la acción a realizar. Este *header* es analizado en los siguientes *co-states* para identificar la tarea recibida y operar en consecuencia.
- *co-state* 4: Chequeo del *header* de **bufferRxTx** en caso de un comando correspondiente al movimiento de los motores. De ser afirmativa la comparación, se llama a la función **MoveMotor()** para la atención de dicha tarea.
- *co-state* 5: Verifica si hay algún evento nuevo en la interfaz web y realiza un chequeo de *variables de estado* por medio de la función **CheckVariables()**. Esta función detecta posibles combinaciones erróneas entre los relés y sensores, las cuales, están representados por las variables **mbSensorStatus** y **mbSensorStatus**. En caso de detectar algún estado prohibido, se detendrá la operación en curso e informará a la

PC de Control, la cual, posee la información del procedimiento a realizar. Un ejemplo de un estado prohibido es que el relé de los motores de escaneo estén habilitados junto con el fin de carrera que indica el límite de recorrido de alguno de los ejes acimutal o cenital.

- *co-state* 6: Chequeo del *header* de **bufferRxTx** en caso de un comando correspondiente al láser. En caso de dar afirmativo, a continuación se encuentra el comando a enviar por el puerto serie. La comunicación con el láser es administrada por la función **SetLaser()**.
- *co-state* 7: Chequeo de evento de la página web y verificación del *header* de **bufferRxTx** en caso de un comando de pedido de estado del sistema. Esto significa que la PC de Control quiere actualizar el valor de todas las *variables de estado*. En caso de ser afirmativo, se actualizan las *variables de estado*, llamando a las funciones **GetSensorState()** y **GetLaserState()** y se responde al pedido enviando la información a **lidarTask**.
- *co-state* 8: Verificación del *header* de **bufferRxTx**, por si corresponde a un comando de *seteo* de relés. En caso de dar afirmativa la comparación, se atiende el requerimiento modificando la variable de estado **mbRelayStatus**. A continuación, se llama a la función **RefreshRelay()** para reflejar la información actualizada de **mbRelayStatus** en la interfaz de salida.
- *co-state* 9: Verificación del *header* de **bufferRxTx**, por si corresponde a un pedido de fin de conexión. En caso afirmativo, se cierra la conexión en curso, sin desatender todos los demás procesos, como los de verificación de las *variables de estado*.
- *co-state* 10: Se atiende nuevamente a la interface web, y se limpia el *buffer* **bufferRxTx**. Esto se realiza debido a que se está por iniciar una nueva ronda de *co-states*, por lo que se evita de ejecutar el que pueda tener cargado, ya que se ejecutó en algún *co-state* anterior.
- *co-state* 11: Realiza un chequeo y actualización de variables. Los diferentes chequeos son realizados por las siguientes funciones:
 - **CheckVariables()**.
 - **RefreshRelay()**.
 - **UpdateVarWeb()**, **UpdateSensorWeb()** y **UpdateLaserWeb()**: Actualizan las diferentes variables de la página web, las cuales reflejan los valores de los sensores, relés y estado del lidar de forma gráfica.
 - **http_handler()**: Verifica de un nuevo evento en la interfaz web, y ejecuta la función correspondiente.

Como se puede observar, los *co-states* 1 y 2 se encargan de actualizar las variables generales del sistema (sensores, relés, láser y sistema en general) y atender los requerimiento del *web-server* (por medio de la función **http_handler()**). Luego, en el *co-state* 3 está la recepción de datos enviados desde el proceso **lidarTask** (a describirse en 5.4.2), y a partir del *co-state* 4 en adelante, analiza el *string* recibido, el cual es almacenado en la variable **bufferRxTx**. Este *string* es también llenado por los eventos de la interfaz

web, los cuales, se encargan de modificar las *variables de estado* que disparan los diferentes procedimientos, dejando a los *co-states* siguientes la interpretación y ejecución de los mismos. La forma de trabajar de la interfaz web será descrita en sección 5.3.2. La manera de salir de este lazo de *co-states* es por medio de la recepción del comando de salida, el cual, es enviado por **lidarTask** y ejecutado desde **adq** por medio de su interfaz gráfica. Este requerimiento es procesado en el co-state número 9. Esta salida es realizada cuando los programas de la PC se cerraron debido a la finalización de la adquisición, por lo que el microcontrolador cierra la conexión en curso y espera una nueva. En caso de no recibir algún comando desde la PC de Control, este *software* se encargará de mantener actualizadas las *variables de estado*, verificando que no existan estados prohibidos en ellas.

A continuación se da una descripción detallada de las *variables de estado*.

5.3.1.1. Variables de estado

Como se introdujo en la sección anterior, el estado del lidar es almacenado en diferentes variables, denominadas *variables de estado*. Cada una de ellas describen la situación en la que se encuentra el *hardware* o proceso en ejecución. Estas poseen información de: sensores, relés, láser (estado y temperatura del cristal), posición de los motores (de auto-alineación y escaneo), y del estado del lidar en general. Por medio de estas variables se puede describir la situación en que se encuentra el *hardware* o proceso en ejecución.

A continuación, un cuadro con el nombre de cada variable, junto con una breve descripción:

Variables de estado	
Variable	Descripción
mbSensorStatus	Estado de los sensores. Cada uno de sus bits corresponde al estado de un sensor (“0” para conector abierto y “1” para cerrado).
mbRelayStatus	Estado de los relés. Cada uno de sus bits corresponde al estado de un relé. Se utiliza la misma lógica que mbSensorStatus (“0” para contactor abierto y “1” para cerrado).
iLaserStatus	Variable de estado del láser. Los valores de esta variable son entregados por el láser ante su requerimiento. La información del <i>set</i> completo de estados de puede encontrar en el manual del láser.
iLaserTemp	Temperatura del láser. Su valor es entregado por el láser ante su requerimiento. El microcontrolador mantiene esta información actualizada ya que es un parámetro muy importante para el correcto funcionamiento del mismo.
iMotorStatus	Indica el estado de movimiento de algún motor.
iDecAcimuthValue	Valor decimal del <i>encoder</i> del motor de escaneo acimutal.
iDecZenithValue	Valor decimal del <i>encoder</i> del motor de escaneo cenital.
iLidarStatus	Estado general del sistema, el cual, es función de diferentes combinaciones de estado de los relés, sensores, motores y láser.

Cuadro 5.3.2: Diferentes variables de estado y su descripción.

Como se describió en la figura 5.2.2, los procesos desde la PC de Control que se comunican con el microcontrolador son **lidarTask** y el navegador web, permitiéndole al

operador conocer el estado del sistema y controlarlo de manera remota. Una de las tareas más importantes que tiene el proceso **lidarTask** es la de pedir continuamente el estado de estas variables, atendiendo este pedido por parte del microcontrolador en su *co-state* 7, y almacenándolas con los mismos nombres.

El control de las *variables de estado* por medio del proceso **lidarTask** es realizado por medio de comandos, los cuales, el microcontrolador se encarga de modificar primero la variable, para luego ser reflejadas en el *hardware* por medio de las funciones correspondientes.

La modificación de estas variables desde la interfaz web es accediendo directamente a ellas, ya sea para modificar el estado de los relés (**mbRelayStatus**), disparar un proceso automático (**mbLidarStatus**), o leer el estado de los sensores (**mbSensorStatus**). Para el caso de enviar algún comando al láser, lo que se hace es llenar el buffer **bufferRxTx**, como si lo hubiera recibido desde el proceso **lidarTask**, para que sea atendido en el *co-state* número 6. En el diagrama de la figura 5.3.1 se muestra esquemáticamente una idea general de este funcionamiento.

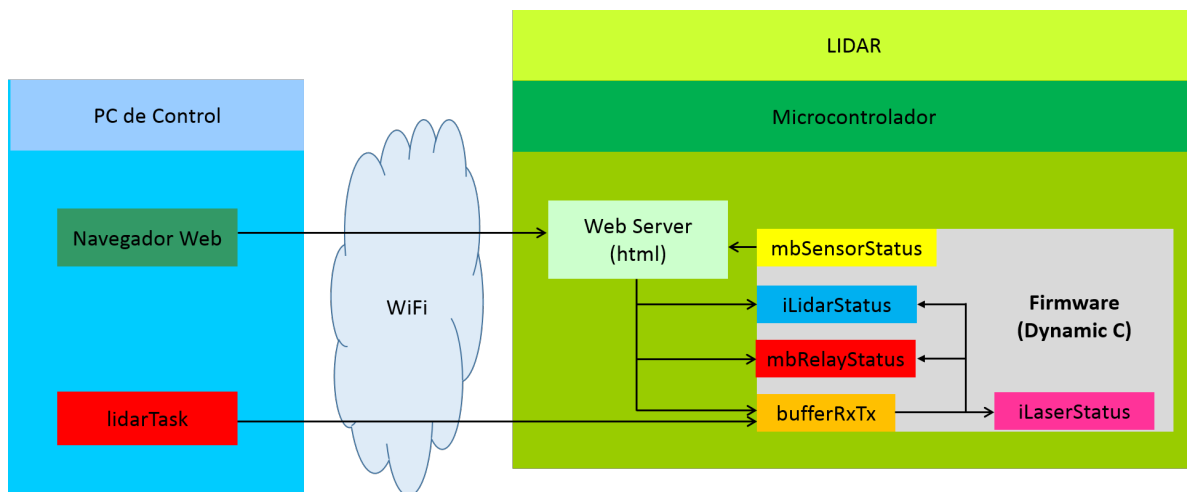


Figura 5.3.1: Interacción entre los diferentes procesos de la PC de Control y las variables estado que poseen el *firmware* del microcontrolador.

A continuación, se describen cada una de las variables de estado con los diferentes valores que pueden adoptar y su significado.

Variables de estado de las entradas: Estas variables adquieren sus valores en función del estado de los sensores, fines de carrera y *encoders*, conectados a la interfaz de entradas descrita en el capítulo 4 sección 4.3.3.3. Para su lectura se llama a la función **GetSensorState()**, la cual es la encargada de administrar las señales de *latch*, *clock* y datos del registro desplazamiento paralelo-serie, guardando el estado de sus bits en la variable correspondiente. El primer bit leído es el menos significativo del registro desplazamiento, por lo que corresponde al mismo orden de bit de su variable. Esta función es llamada de ahora en más de un *co-state*, lo que permite mantener actualizado el estado de todas las entradas con el menor retraso posible.

Los 8 bits menos significativos del registro desplazamiento se guardan en la variable **mbSensorStatus**, donde cada uno de sus bits corresponde al estado **ON/OFF** (1/0) de un sensor/fin-de-carrera. El conexionado de los mismos sigue el orden descrito en el cuadro 4.3.2 del capítulo 4, y se puede ver en el cuadro 5.3.3.

mbSensorStatus	
Indice de bit	Control
0	Fin de carrera contenedor abierto.
1	Fin de carrera contenedor cerrado.
2	Alarma para abrir el contenedor.
3	Alarma para cerrar contenedor.
4	Sensor HOME acimut.
5	Sensor HOME cenital.
6	Sensor alerta cenital.
7	Sensor alerta acimutal.

Cuadro 5.3.3: Relación del bit de la variable **mbSensorStatus** junto con el sensor que controla.

Los siguientes 14 bits del registro desplazamiento se encuentran conectado el encoder cenital, y en los 14 siguientes al acimutal. Cada uno de estos datos son guardados en las variables **iDecAzimuthValue** y **iDecAzimuthValue** respectivamente, siendo cada una de estas variables de 16 bits. En esta interfaz quedan bits sin usar, los cuales son reservados para futuras actualizaciones.

Variable de estado de las salidas (estado de relés): El estado de estos dispositivos se guarda en una sola variable de 16 bits llamada **mbRelayStatus**. De la misma manera que **mbSensorStatus**, cada uno de sus bits representa el estado **ON/OFF** (1/0) de un determinado relé, conectado a la interfaz de salida (capítulo 4, sección 4.3.3.4). Como en la interfaz de entradas, el bit menos significativo del registro desplazamiento corresponde al mismo orden de bit de la variable de estado **mbRelayStatus**, siguiendo el mismo orden indicado en el cuadro 4.3.3 del capítulo 4:

mbRelayStatus	
Indice de bit	Dispositivo
0	Relé bomba de cilindros para apertura/cierre del contenedor.
1	Relé de válvula de cilindro de apertura del contenedor.
2	Relé de válvula de cilindro de cierre del contenedor.
3	Relé de refrigerador de agua del láser.
4	Relé del láser.
5	Relé de luz del contenedor.
6	Relé de placa de adquisición y fuente de fotomultiplicadores.
7	sin uso.

Cuadro 5.3.4: Relación del bit de la variable **mbRelayStatus** junto con el relé que controla.

Como se apuntó anteriormente, ante la orden de cambio de estado de un relé, el *firmware* sólo se encargará de cambiar el bit correspondiente del dispositivo en la variable **mbRelayStatus**. Luego, la función **RefreshRelay()** es llamada regularmente a lo largo de diferentes *co-states*, para sacar por la interfaz de salida el contenido de **mbRelayStatus**. Es en esta función, donde se administran las señales de *clock*, *latch* y datos de la interfaz de salida (ver figura 4.3.10 del capítulo 4).

Variable de estado del láser: Los diferentes estados del láser están representados por un valor de 8 bits, el cual, es devuelto por el láser al enviarle el comando correspondiente. Este valor, es almacenado por el *firmware* en la variable **iLaserStatus**. Los estados más relevantes para la operación del lidar, junto con el nombre representativo utilizado en el *firmware*, se listan en el siguiente cuadro:

iLaserStatus	
Nombre del estado	Valor en hexadecimal
LASER_STOP	0x00
LASER_STAND_BY	0x01
LASER_READY	0x02
LASER_Q_SWITCH	0x03
LASER_EMISSION	0x04
LASER_OFF	0x05
LASER_ERROR	0X66
LASER_INIT	0x55
LASER_CLOSING	0xAA

Cuadro 5.3.5: Principales valores de estado del láser (en hexadecimal) y sus nombres definidos en el código del programa.

Esta variable es actualizada regularmente por medio de la función **GetLaserState()**, la cual es llamada en dos *co-state*. También, envía al láser el comando encargado de obtener la temperatura del cristal, ya que es un parámetro muy importante para la correcta operación del mismo. Su valor es almacenado en la variable **iLaserTemp**.

Los últimos 2 valores del cuadro 5.3.5 (**LASER_INIT** y **LASER_CLOSING**), son *seteados* para inicializar/finalizar el procedimiento de encendido/apagado del láser. Estos no corresponden a valores entregados por el dispositivo, sino que representan procedimientos los cuales incluyen una serie ordenada de diversos comandos. Este procedimiento de inicialización/finalización es administrado de manera remota por el proceso **lidarTask**, desde la PC de Control. Más detalles sobre esta automatización será desarrollado en la sección 5.4.2.5.

Variable de estado general del sistema: Esta variable es una combinación de los estados anteriores, y es principalmente utilizada en la automatización de procedimientos. El nombre utilizado es **iLidarStatus**, y los valores que puede adoptar se muestran en el siguiente cuadro:

iLidarStatus	Valor en hexadecimal	Significado
LIDAR_OFF	0x00	Láser, y electrónica de adquisición apagados, contenedor cerrado.
LIDAR_READY	0x5A	Láser, y electrónica de adquisición encendidos y listos para la toma de datos.
LIDAR_ON	0xFF	Lidar midiendo.
LIDAR_INIT	0xA5	Proceso de inicialización en ejecución.
LIDAR_CLOSING	0xAA	Proceso de finalización en ejecución.

Cuadro 5.3.6: Valores de la variable **iLidarStatus**, junto con una breve descripción de las mismas.

Esta variable es modificada en función del estado general del sistema, pero principalmente, es utilizada para indicar el desarrollo de los procedimientos de inicialización y finalización lidar. Por ejemplo, para disparar estas secuencias, se *setea* a esta variable con los estados LIDAR_INIT o LIDAR_CLOSING, para la inicialización o finalización respectivamente del equipo. Con alguno de estos estados, la PC de Control administrará la secuencia de comandos correspondiente a estas operaciones.

5.3.1.2. Formato de los comandos TCP/IP

Como ya se ha comentado, la principal tarea del microcontrolador es la de responder a las órdenes por parte de la PC de Control. En esta sección, se describirá el formato de los comandos enviados desde el proceso **lidarTask** (ver figura 5.2.2). Las órdenes ejecutadas desde la interfaz web obedecen a otros mecanismos, las cuales, se describirán en la sección 5.3.2.

Estos comandos, si bien son enviados desde **lidarTask** hacia el microcontrolador, pueden ser generados en el proceso **adq**. Se buscó un formato de comando lo más claro posible, facilitando cualquier tipo de *debugging*. Para esto se siguieron 3 premisas, las cuales definieron las características principales de los mensajes:

- Los comandos están formados por cadena de caracteres ASCII de un largo predefinido.
- Los comandos tienen una estructura formada por un encabezado (*header*) de tamaño fijo, más un mensaje, el cual, es función del encabezado. La respuesta del microcontrolador sigue el mismo formato.
- El *software* receptor del mensaje, responde al comando indicando el estado de la recepción: error, *handshaking*, o respuesta con datos, en caso de que el comando signifique un pedido de información.

Por lo tanto, se definió un mensaje formado por un *string* ASCII de 100 bytes. Éste está compuesto por un *header* de 7 bytes, indicando la acción a realizar, seguido de los

parámetros necesarios para ejecutar dicha orden (o de las variables requeridas). Todo este comando se envía utilizando el carácter “*” como delimitador entre el *header* y los diferentes parámetros, como también, para completar la cantidad de *bytes* definida para la trama:

`"HEADER*[param1]*[param2]*[paramN]*...*" 1`

En algunos casos, la respuesta a un comando es simplemente un *string* de *handshake*, indicando a la PC de Control que la tarea fue realizado o la correcta recepción del mensaje.

Para operar el lidar, se definieron 5 comandos diferentes, los cuales se encargan de controlar las *variables de estado* descritas en la sección anterior. El detalle de cada uno de los comandos es desarrollado en el apéndice B. Este *set* de comandos son básicos y simples, los cuales, por medio de la correcta combinación ordenada de ellos es posible la realización de procedimientos más complejos, como la auto-alineación de los telescopios. Esta coordinación está a cargo del proceso **lidarTask** en la PC de Control. De esta manera, evitando secuencias predefinidas en el *firmware*, se logra un sistema más dinámico, pudiendo realizar actualizaciones en sus prestaciones de forma fácil, ya que se evita la reprogramación del microcontrolador.

5.3.2. Descripción del *web-server*: control manual y automático del *hardware* del lidar

En la sub-sección 4.3.3.1 del capítulo 4, se describió las capacidades de web-server que posee el microprocesador Rabbit RCM2200. Esto significa que, además del *firmware* programado en Dynamic C, se le puede cargar una interfaz HTML, que estará disponible si se accede por medio de un navegador web. De esta manera, se logra acceder a sus recursos e interactuar remotamente con el microcontrolador por medio de una interfaz gráfica. En este trabajo se ha implementado para controlar el estado de los sensores y relés, como también, para disparar procesos automáticos en el lidar. Se han programado 2 niveles de acceso a los dispositivos: modo administrador (por medio de la interfaz **indexADMIN.html**) y modo operador (por medio de **indexSHIFTER.html**). En ambas interfaces se puede acceder al estado de los sensores y relés de manera visual por medio de leds, los cuales representan el valor de cada bit de la variables **mbSensorStatus** y **mbRelayStatus** (ver cuadros 5.3.3 y 5.3.4). En la figura 5.3.2 se observa la interface de administrador.

¹La representación “*...*” significa que se rellena el *string* con el carácter “*” hasta completar los 100 *bytes* de la trama que forma el comando.

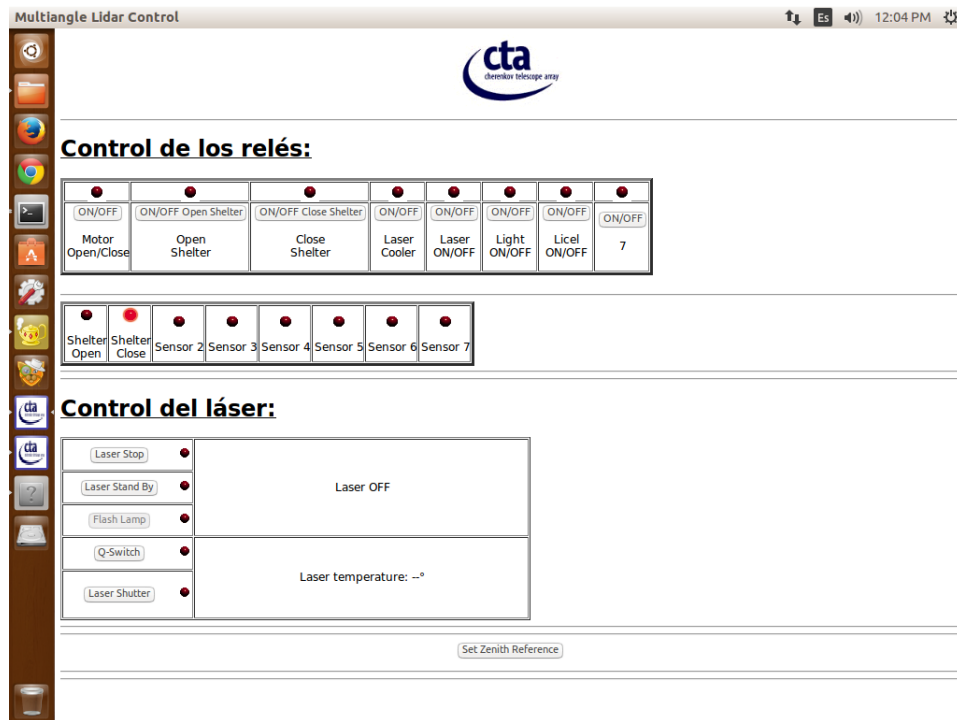


Figura 5.3.2: Interface **indexADMIN.html** servida por el microcontrolador para el control manual de los diferentes dispositivos del lidar.

La idea de esta interfaz es que sea utilizada por personal experto, ya sea en procedimientos de mantenimiento o para probar solo una parte del funcionamiento del *hardware*.

La ejecución de las acciones de cada botón de esta interfaz fueron implementadas por medio de funciones CGI (*Common Gateway Interface*). Estas funciones se encargan de modificar la *variable de estado* correspondiente, no sin antes realizar los chequeos de coherencia necesarios para evitar estados prohibidos. Por ejemplo, para el caso de un comando hacia el láser, no se enviará si el relé del mismo se encuentra abierto.

Desde esta interface, se puede controlar el estado de cada relé, pudiendo operar los dispositivos de manera manual. También se pueden enviar al láser cada uno de los comandos básicos para su puesta a punto y operación.

En la última figura (5.3.2), se pueden observar 3 diferentes partes:

- **Control de relés:** Por medio de esta interfaz se permite activar/desactivar cada uno de los relés, por lo que la función CGI asociada solo modifica el bit correspondiente en la variable **mbRelayStatus**. Luego, la función **RefreshRelay()** se encarga de sacar estos valores por la interfaz de salida.
- **Estado de los sensores:** En esta sección solo se muestra de manera pasiva el estado de activación de cada uno de los sensores instalados en el sistema.
- **Control del láser:** Se disponen de 5 botones necesarios para su operación básica, desde su encendido hasta el disparo. La secuencia correcta es en orden descendente, y se habilitan solo si se está en condiciones de ejecutar la orden. También, sobre la parte derecha, se brinda información acerca del estado del láser, y su temperatura.
- **Configuración del cero cenital:** Se dispone de un control para la configuración dinámica del cero cenital. La acción de este botón consta de tomar el actual valor

que entrega el *encoder* cenital y definirlo como el valor ángulo cenital igual a cero. Luego, el valor cenital final, se calculará como la resta del valor que entrega el *encoder* con este valor de referencia.

El tratamiento que realiza esta interfaz a las *variables de estado* es igual al que se realiza ante la recepción de un comando **TCP/IP**. Esto significa que las acciones asociadas a cada botón sólo se encargarán de modificar la variable correspondiente, o en algunos casos, configurar la variable de control **bufferRxTx** con el formato del comando descrito en la sección 5.3.1.2. Por ejemplo, para el control de los relés, cada función CGI se encarga de setear el bit correspondiente en la variable **mbRelayStatus**, para más tarde reflejar su valor en el *hardware*.

Para el caso de un comando del láser, la función **CGI** correspondiente a cada botón es la de cargar en **bufferRxTx** el comando correspondiente. El formato es descrito en el apéndice B, en donde, en este caso, el *header* utilizado es ***LASER***. De esta manera, cuando el *loop* del *firmware* pasa por el *co-state* número 6, se detecta el *header* correspondiente al comando del láser y se procede enviándolo por el puerto serie. Así, el núcleo principal del *firmware* es el mismo: responder a las órdenes cargadas en la variable de control (**bufferRxTx**) y reflejar en el *hardware* las *variables de estado*, siendo transparente el origen de las mismas.

Se observa en la figura 5.3.3 la interfaz del operador (**indexSHIFTER.html**):

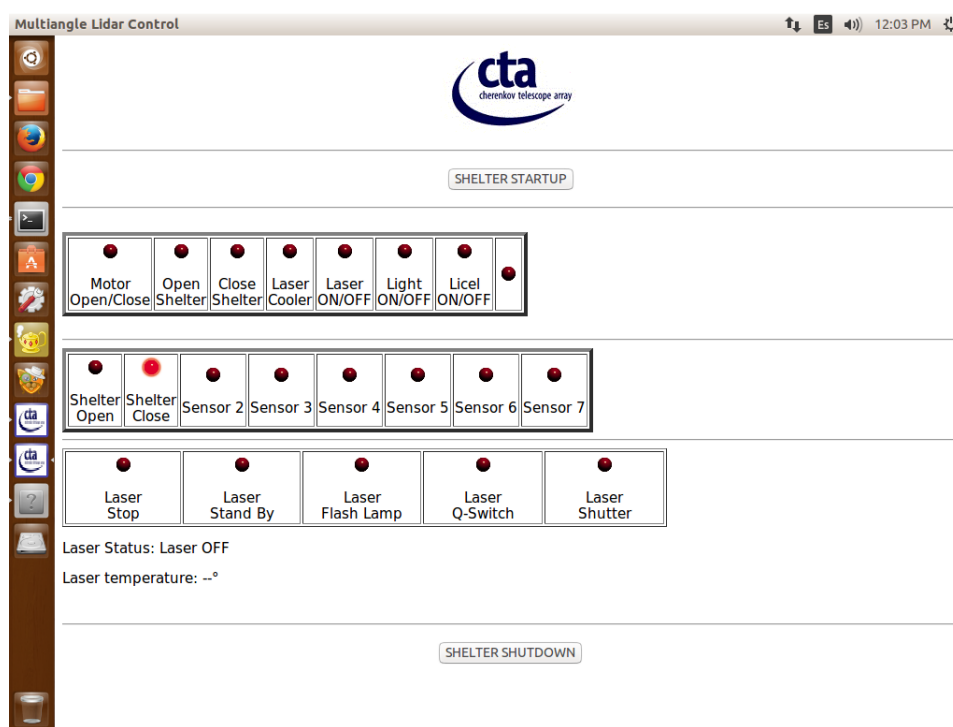


Figura 5.3.3: Interface **indexSHIFTER.html** servida por el microcontrolador para la operación automática del *hardware* del lidar.

Como puede observarse, en esta interfaz solo se tiene un acceso visual al estado de los sensores, relés y láser, disponiendo sólo de controles para ejecutar la inicialización/-finalización automática del *hardware*. Estas tareas constan de una secuencia ordenada de activación/desactivación de los dispositivos necesarios para comenzar o finalizar la adquisición. Estos procedimientos son disparados por medio de los botones **SHELTER**

STARTUP y **SHELTER SHUTDOWN**, cuya tarea es simplemente configurar la variable **iLidarStatus** en el estado correspondiente: **LASER__INIT** para la inicialización y **LASER__CLOSING** para la finalización (ver cuadro 5.3.5). Con la variable **iLidarStatus** modificada, es transmitida luego hacia la PC de Control, donde el proceso **lidarTask** se encargará de administrar la automatización de estos procedimientos. Los detalles de esta automatización serán desarrollados en la sección 5.4.2.5, donde se describe el proceso **lidarTask**.

5.4. Procesos de la PC del operador: adquisición, visualización de señales y control del lidar multi-ángulo

En esta sección se describirá el *software* que utilizará el operador para la toma de datos. Mediante el mismo, se podrá tener el control de todo el proceso de adquisición, tanto de modo automático como manual. Estos procesos ya se han presentado en la figura 5.2.2 del lado derecho. Sus nombre son: **adq**, **lidarTask** y **plot**, los cuales se encargan de realizar 3 tareas específicas, comunicándose entre sí para la coordinación de las mismas. Estas tareas, junto con el nombre del proceso que la realiza son:

- Adquisición de las señales lidar $\implies$ proceso **adq**.
- Graficar en tiempo real las señales adquiridas $\implies$ proceso **plot**.
- Comunicación/control/automatización con el *hardware* del lidar $\implies$ procesos **lidar-Task** y navegador web.

Gracias a esta separación de tareas en diferentes procesos se ha logrado un sistema modular, donde se comunican entre sí por medio de diferentes tipos de mensaje de control. Para esta comunicación se utilizaron *sockets* TCP/IP y *shared-memory*, diferenciando la utilización de uno u otro en función de la urgencia de la información transferida. Un mensaje enviado por medio de un *socket*, será tomado como una orden, la cual, deberá ser ejecutada cuanto antes. Los *shared-memory*, son información compartida, implementada entre **adq** y **lidarTask**. Esta información debe estar disponible en ambos procesos, y accedida por cada uno en el momento que lo requieran.

En resumen, se muestra en el diagrama de la figura 5.4.1 los diferentes procesos de la PC de Control y su vinculación por medio de los IPC utilizados.

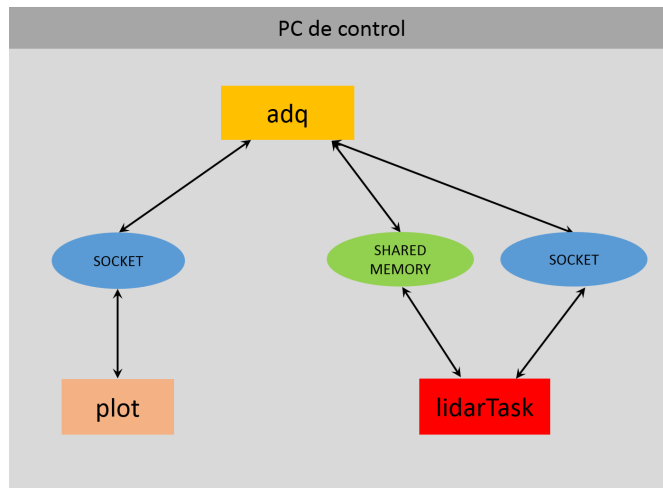


Figura 5.4.1: Procesos de la PC de Control y su vinculación mediante diferentes métodos IPC.

Finalmente, la comunicación entre **lidarTask** y el microcontrolador es realizado también por medio de *sockets* TCP/IP. La utilización de *sockets* TCP/IP para comunicar procesos dentro de la misma PC de Control tiene un motivo, y es el hecho de poder utilizar su *handshaking*, pudiendo el emisor asegurarse la recepción del mensaje por parte del destinatario.

En la figura 5.4.2, se observa un diagrama esquemático de los diferentes procesos nombrados, junto con su vinculación con los diferentes dispositivos en el lidar.

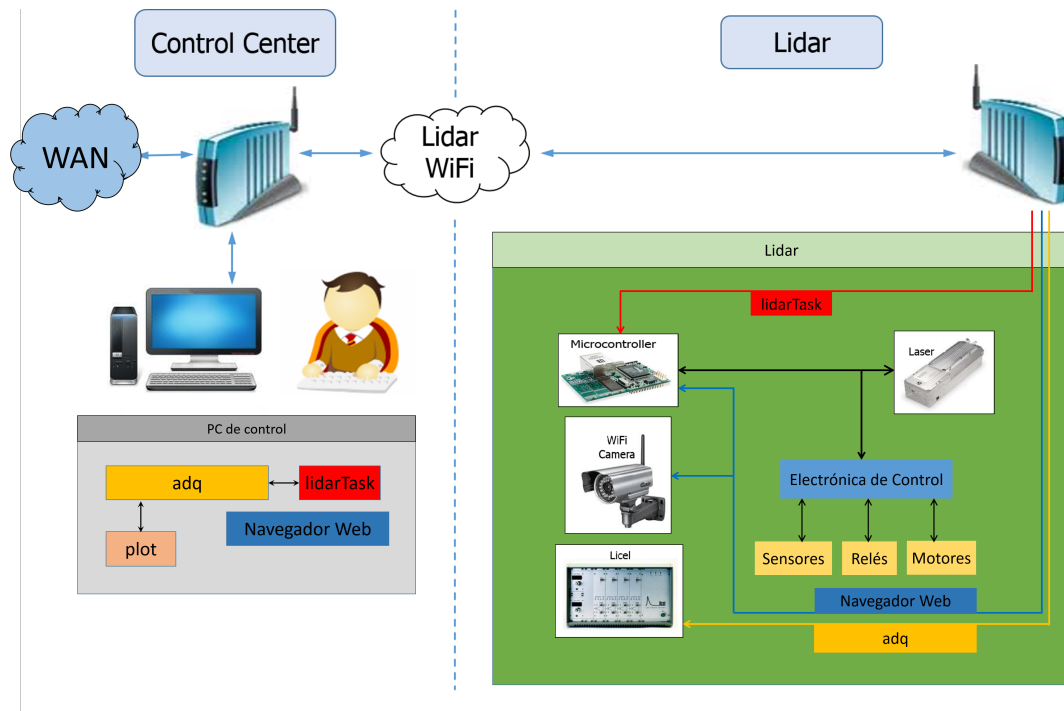


Figura 5.4.2: Diagrama esquemático de la vinculación de los diferentes procesos de la PC de Control con los dispositivos en el lidar multiángulo. Notar los diferentes colores para identificar la vinculación entre el proceso y el dispositivo.

Una breve descripción de la función de cada proceso se describe a continuación:

- **Adquisición de datos (adq):** Es el proceso central, el cual se encarga de adquirir las señales y guardarlas en sus correspondientes archivos, marcando de esta manera el *timing* del sistema durante la toma de datos. Para esto, se comunica directamente con la electrónica de adquisición (Licel), por medio del vínculo WiFi. Ésta es la única comunicación que tiene con el *hardware*, ya que cualquier otra información que necesite del lidar lo hace por medio del proceso **lidarTask**, dedicado especialmente para esta tarea.

Luego de generar cada archivo, envía su *path* a los demás procesos en caso de ser necesario. En el caso de **plot**, se lo envía para que grafique las señales, y en el caso de **lidarTask**, solo cuando el procedimiento de auto-alineación de los telescopios está en ejecución.

- **Visualización de datos (plot):** Este proceso recibe de **adq** la dirección del archivo a graficar y lo muestra. Posee una interfaz gráfica con diferentes controles para seleccionar las señales que se desean ver, como también, opciones de cambio de escala, *zoom* o corrección en rango.
- **Control del hardware:** esta tarea se realiza por medio de dos procesos: **lidarTask** y un navegador web. A continuación un resumen de estos dos procesos:
 - **Proceso lidarTask:** Es el proceso encargado de obtener toda la información del lidar, interrogando al microcontrolador a intervalos regulares sobre el estado de los relés, sensores, estado del láser y de los motores. Esta información es compartida con el proceso **adq** para que la utilice conforme sea necesaria. De esta manera, cualquier información que necesite **adq** acerca del lidar, será obtenida mediante **lidarTask**, ordenando de esta manera el tráfico de información hacia el microcontrolador. También, este proceso es el encargado de las tareas de autoalineación de los telescopios y del escaneo del sistema. Una descripción detallada de esta tarea se dará en el capítulo 6, donde se desarrollará el *hardware* y el *software* realizado para este procedimiento.
 - **Navegador web:** Por medio de un navegador, el operador podrá acceder a la interfaz gráfica de la *web-cam* y al servidor web que posee el microcontrolador. Utilizando la capacidad del microcontrolador Rabbit de almacenar un servidor web, se programó una interfaz HTML, para poder acceder al control de relés y sensores en dos modos: *Administrador* y *Shifter*, como se describió anteriormente.

El *software* desarrollado en este trabajo que posee interfaz gráfica (**adq** y **lidarTask**) han sido desarrollados con librerías ROOT [114]. Para esto, una vez definida la clase que administra los eventos de sus controles, se debe llamar continuamente a un método encargado de procesar estos trabajos, el cual se encarga de lanzar la función correspondiente. Por lo tanto, y para no perder ninguna orden realizada por el operador, los procesos con interfaz gráfica están formados por dos sub-procesos *padre/hijo*. En esta división, el *hijo* es el encargado de la interfaz gráfica, atendiendo todos los eventos generados por el operador, y el *padre* toma la acción ejecutada y la procesa.

Se desarrollará en los siguientes párrafos la forma de trabajo y filosofía de comunicación entre los mismos.

5.4.1. Proceso *adq*

Como lo indica su nombre, este proceso se encarga de adquirir las señales lidar, comunicándose directamente con la electrónica de adquisición a través de un *socket* TCP/IP. Es su tarea configurar este dispositivo en base a sus archivos de configuración, como también, el envío de los comandos correspondientes para el inicio/fin de cada adquisición. Este es el único dispositivo con el que se comunica este proceso, ya que la información restante acerca del *hardware* es obtenida a través de **lidarTask**. Una vez adquiridos los vectores, correspondientes de cada señal lidar, se encargará de generar los archivos y transferir su *path* a los procesos que lo requieran. En el caso de **plot**, esperará la dirección del nuevo archivo adquirido para graficar, y en el caso de **lidarTask**, recibirá la dirección del archivo en caso de que se encuentre en curso el proceso de auto-alineación de los telescopios. Es desde este proceso, de donde se disparan los procedimientos de escaneo y de auto-alineación de los telescopios, los cuales, lidarTask se encarga de su administración.

Basado en la premisa número 6 de las especificaciones del lidar 1.4, se desarrolló un *software* con una interfaz muy limpia, incluyendo solo los controles necesarios para llevar adelante la adquisición. En la siguiente figura, se observa una imagen de la misma:

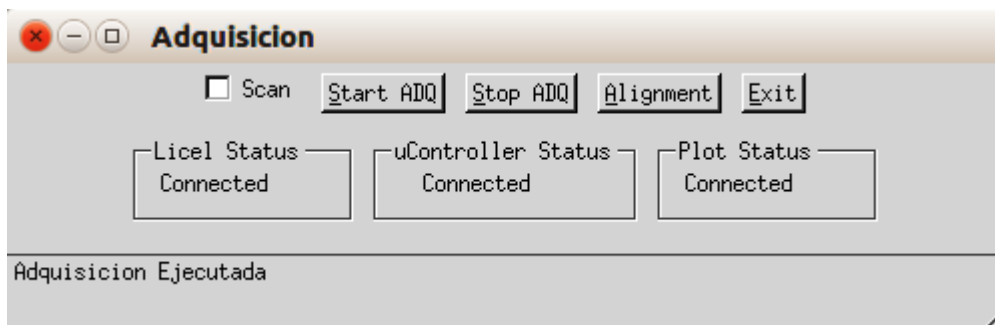


Figura 5.4.3: Interfaz de usuario del proceso adquisición.

En esta interfaz se puede observar sólo los botones para iniciar/detener la adquisición, alinear los telescopios, la opción de adquirir en modo escaneo y el botón de salida. Los botones “**Start ADQ**”, “**Alignment**” y el *check-box* “**Scan**” se habilitan solo cuando es posible comenzar la adquisición. Esto significa que el lidar debe estar inicializado y en condiciones de empezar la toma de datos. El procedimiento de inicialización/finalización del lidar es descrito en la sub-sección 5.4.2.5 de este capítulo.

Tanto para desencadenar la secuencia de escaneo (por medio del casillero “**Scan**”) como para iniciar el procedimiento de auto-alineación (por medio de el botón “**Alignment**”), **adq** enviará un mensaje a **lidarTask** para que se encargue de administrar dichas tareas, en coordinación con el microprocesador. En la parte inferior de la interfaz gráfica de **adq** (figura 5.4.3), una barra de estado informa al operador acerca del desarrollo cada proceso.

Para una mejor administración de las tareas a realizar, **adq** se divide en dos procesos por medio de la instrucción *fork()*, generando un par *padre/hijo*. Mientras que la tarea del *hijo* es la de atender los eventos que se producen en la interfaz gráfica, el *padre* es el encargado de administrar el proceso principal de adquisición de datos.

La toma de datos es controlada tanto por el operador desde la interfaz gráfica, como por el lidar, través del proceso **lidarTask** en base a las *variables de estado*. De esta manera, ante un error en el equipo, es posible la detención automática de la adquisición. Es por eso que, para controlar el flujo de las tareas en este proceso, se implementó una

variable de control del tipo *shared-memory* compartida con **lidarTask**. El nombre de esta variable es **shmAdqTask**, y está formada por un *string* de caracteres ASCII que contiene la tarea a realizar. Mientras que el sub-proceso *hijo* modifica **shmAdqTask** en función del botón presionado en la interfaz gráfica, **lidarTask** solo la modifica para detener la adquisición ante un eventual estado prohibido en las *variables de estado*.

Para dar lugar a una descripción más detallada de la forma de trabajo de este proceso, se muestra en la figura 5.4.4 un esquema general de funcionamiento.

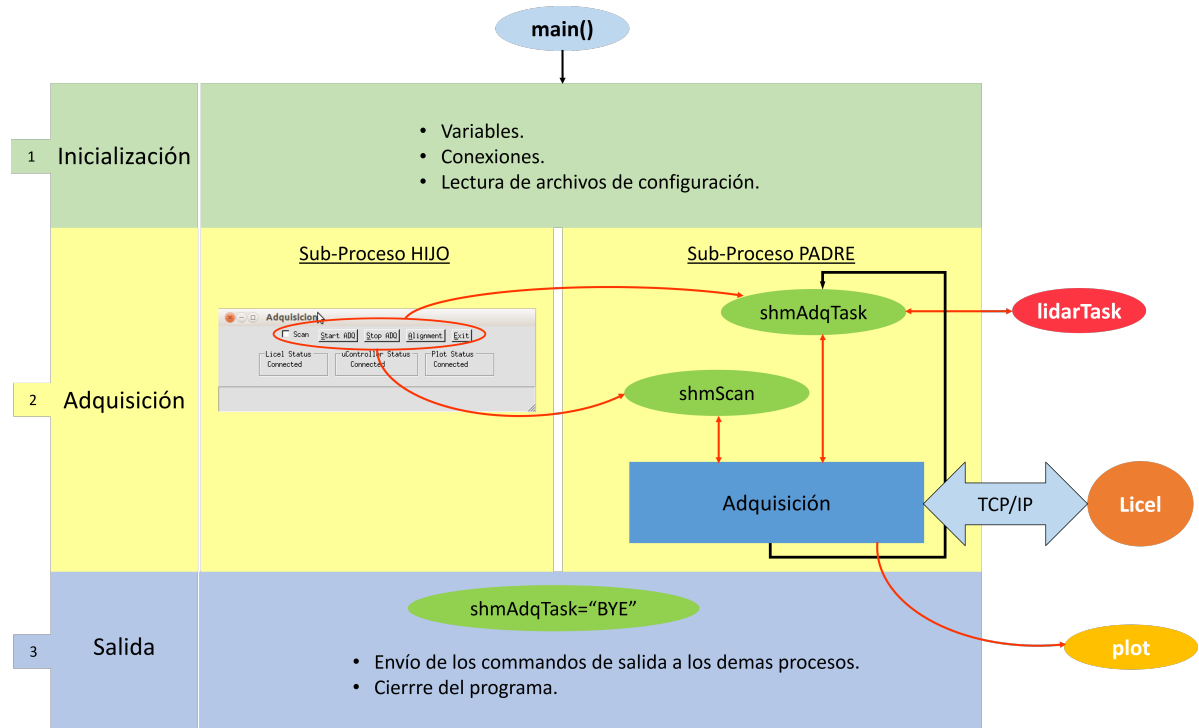


Figura 5.4.4: Esquema general de funcionamiento del proceso **adq**. Se explicitan las variables *shared-memory* principales para la operación del mismo.

A continuación, una descripción más detallada de los procesos padre e hijo de este proceso.

5.4.1.1. Proceso HIJO

La principal tarea de este sub-proceso es la administración de la interfaz gráfica, por medio de la clase **MyMainFrame** (de las librerías ROOT [114]) y sus métodos. Luego de lanzarla, este proceso configura los *shared-memory* compartidos con el *padre*, mediante los cuales permite intercambiar información. Los métodos correspondientes a los eventos de cada botón, modifican las variables del tipo *shared-memory* que controlan el flujo del proceso *padre*, como **shmScan** y **shmAdqTask**. La primera de estas variables informa al sub-proceso *padre* y a **lidarTask** cuando se inicia el proceso de escaneo, para disparar la sincronización necesaria para esta tareas, la cual, es administrada por **lidarTask** (ver sección 5.4.2.4).

La variable compartida **shmAdqTask** contiene las tareas principales del proceso de adquisición, administrado por el *padre*, por lo que el sub-proceso *hijo* tiene acceso a la misma para control el control por medio de la interfaz gráfica.

5.4.1.2. Proceso PADRE

De la misma manera que el proceso *hijo*, el *padre* comienza configurando los *shared-memory* y conexiones TCP/IP con el sub-proceso *hijo*, los procesos **plot** y **lidarTask**. También, abre la conexión TCP/IP con la electrónica de adquisición, y la configura en base a la información almacenada en los archivos **Acquis.ini** y **global_info.ini** (el formato de estos archivos siguen los mismos lineamientos de la empresa Licel para sus placas de adquisición [115]). Una vez realizados estos pasos, se pasa al núcleo principal, el cual, es la adquisición de datos.

De la misma manera que en el *firmware* del microcontrolador, este núcleo consta de un *loop* principal, el cual es controlado por la variable **shmAdqTask**. Esta variable, al ser del tipo *shared-memory*, es modificada por el proceso *hijo* y por **lidarTask** según sea conveniente. Los valores que puede adoptar **shmAdqTask**, junto con la acción correspondiente se lista en el siguiente cuadro:

shmAdqTask	
Valor	Acción
“STP”	Proceso detenido.
“STRN”	Adquisición normal.
“STRA”	Adquisición en modo de auto-alineación de telescopios.
“BYE”	Cierre del proceso.

Cuadro 5.4.1: Valores de la variable compartida **shmAdqTask**.

A continuación, una descripción más detallada de cada estado:

Estado shmAdqTask=“STP”

Proceso detenido, a la espera de la ejecución de alguna acción (la variable **shmAdqTask** es inicializada en este estado). Este estado de parada es definido también al presionar el botón **“Stop ADQ”** de la interfaz gráfica (ver figura 5.4.3), por lo que la modifica el proceso *hijo*. Otra manera de que esta variable adquiera el estado de parada es por medio del proceso **lidarTask**, en caso de que en el lidar ocurra un estado prohibido y deba detenerse la adquisición. Esto es posible gracias a la implementación de esta variable como *shared-memory*.

Estado shmAdqTask=“STR”

Este estado es definido por medio del botón **“Start ADQ”** (figura 5.4.3), el cual permite realizar una adquisición estándar. La toma de datos es realizada en base a la configuración guardada en el archivo **Acquis.ini**, y el nombre del archivo es generado en base a los lineamientos de Licel [115].

Estado shmAdqTask=“STRA”

Este estado es definido por medio del botón **“Alignent”** (figura 5.4.3), y permite disparar el proceso de auto-alineación de los telescopios. Esto es un trabajo colaborativo entre el proceso **adq**, encargado de adquirir las señales; **lidarTask**, el cual se encarga de administrar las diferentes mediciones y cuantificar el estado de alineación, y el *firmware* del microcontrolador, encargado de inclinar los correspondientes telescopios. Todo este proceso será detallado en el capítulo 6.

Estado shmAdqTask=“BYE”

Estado de salida del sistema. Debido a que **adq** es el proceso principal, al cerrarse se enviarán también las señales de cierre a los procesos **plot** y **lidarTask**. También, el microcontrolador será notificado del cierre pasando a modo de espera para una nueva

conexión. Este estado es definido por el proceso *hijo* cuando el operador presiona el botón “Exit” en la interfaz gráfica. La orden de salida a los demás procesos se realiza por medio de mensajes TCP/IP.

Es importante aclarar que este cierre tiene que ver con los procesos que corren en la PC de Control, y que por lo tanto, del lado del lidar, queda todavía el procedimiento de finalización del *hardware*. Este procedimiento se debe lanzar desde la interfaz web, accedida por medio de un navegador. Esto se desarrollará en la sub-sección 5.4.2.5.

Cada uno de estos estados corresponde a los botones que se observan en la figura 5.4.3, los cuales, en sus métodos, solo se encargan de configurar a la variable **shmAdqTask** según corresponda.

Para el caso del *check-box* “Scan”, se opera de la misma manera, pero involucra otra variable del tipo *shared-memory*: **shmScan**. Esta variable es compartida con el proceso **lidarTask**, para de esta manera informarle acerca de la ejecución del procedimiento de escaneo. Su contenido es muy simple, y solo contiene un *string* de 5 caracteres, los cuales, poseen el siguiente valor y significado:

shmScan	
Valor	Significado
*YES***	Procedimiento de escaneo INICIADO.
*NO***	Procedimiento de escaneo DETENIDO.

Cuadro 5.4.2: Valores a adoptar por la variable compartida **shmScan**.

Como se verá en la sección correspondiente al proceso **lidarTask** 5.4.2, esta variable es censada para administrar el escaneo del lidar. Para esto, **lidarTask** necesita saber si se está adquiriendo datos, ya que en ese caso, no podrá mover la estructura de escaneo. Esta información es intercambiada por medio de una nueva variable compartida: **shmIsAcq**.

5.4.2. Proceso *lidarTask*

Las tareas principales de este proceso constan del control y lectura del estado del *hardware*, manteniendo actualizadas las *variables de estado* en la PC de Control para poder ser utilizada por los demás procesos que las requieran. Esto genera una gran demanda de tareas, principalmente por el trabajo de coordinación entre el microcontrolador y el proceso **adq**.

Las tareas a realizar por **lidarTask** se pueden resumir en:

- Comunicarse regularmente con el microcontrolador para obtener las *variables de estado* del lidar. Analizar estas variables en busca de estados prohibidos, y en caso de detectarlos, ejecutar las órdenes correspondientes para solucionarlo. En caso de ser necesario, detener la adquisición por medio de la variable compartida **shmAdqTask**.

En la comunicación con el microcontrolador, este proceso funciona como cliente.

- Administrar los procedimientos de inicialización/finalización del *hardware*. Si bien estos procesos son disparados desde la interfaz web, el orden de cada tarea es administrado **lidarTask**. Esta tarea incluye también el envío de los comandos hacia el láser, siguiendo el protocolo que indica su manual. Estos comandos son enviados al láser por medio del microcontrolador a través del puerto serie.

- Administrar el procedimiento de auto-alineación. Esto es realizado en coordinación con el microcontrolador, encargado de mover los motores; y con **adq**, encargado de adquirir las señales en la nueva posición del telescopio. El detalle de este proceso será desarrollado en el capítulo 6.
- Administrar el procedimiento de escaneo. Esto consiste en administrar el envío de los comandos al microcontrolador correspondiente al movimiento del motor de escaneo correspondiente.
- Retransmitir al microprocesador algún mensaje de parte del proceso **adq**. Procesar la respuesta y operar en consecuencia, manteniendo informado a **adq** según sea necesario.

Por lo tanto, **lidarTask** es el encargado de administrar las tareas en el lidar, dialogando permanentemente con el microcontrolador, y compartiendo esta información con el proceso **adq**. En caso de que el proceso **adq** desee enviar un comando hacia el lidar, lo hará por medio de **lidarTask**, siendo un intermediario en la comunicación.

Una de las funciones importantes que realiza este proceso es la de administrar la automatización de diversas tareas, como la autoalineación de los telescopios, el escaneo del sistema, y la automatización de la secuencia de inicialización/finalización del *hardware* para la correcta toma de datos. Todos estos procedimientos requieren de una alta coordinación entre los procesos **adq**, **lidarTask** y el *firmware* del microcontrolador.

También, se encarga de enviar cada segundo los comandos necesarios para conocer el estado del lidar, almacenando dicha información en las *variables de estado*. Éstas son compartidas con **adq** por medio de *shared-memory*, para que este proceso puede contar con la información prácticamente en el mismo momento en que **lidarTask** la recibe.

En cuanto a su lógica de programación, se ha seguido la misma filosofía que el proceso **adq** y del *firmware* del microcontrolador. Esto significa que está basada en un *loop* principal, el cual su flujo es bifurcado por las variables de control correspondientes. Para una mejor descripción, se muestra en la figura 5.4.5 un esquema general del funcionamiento de este proceso.

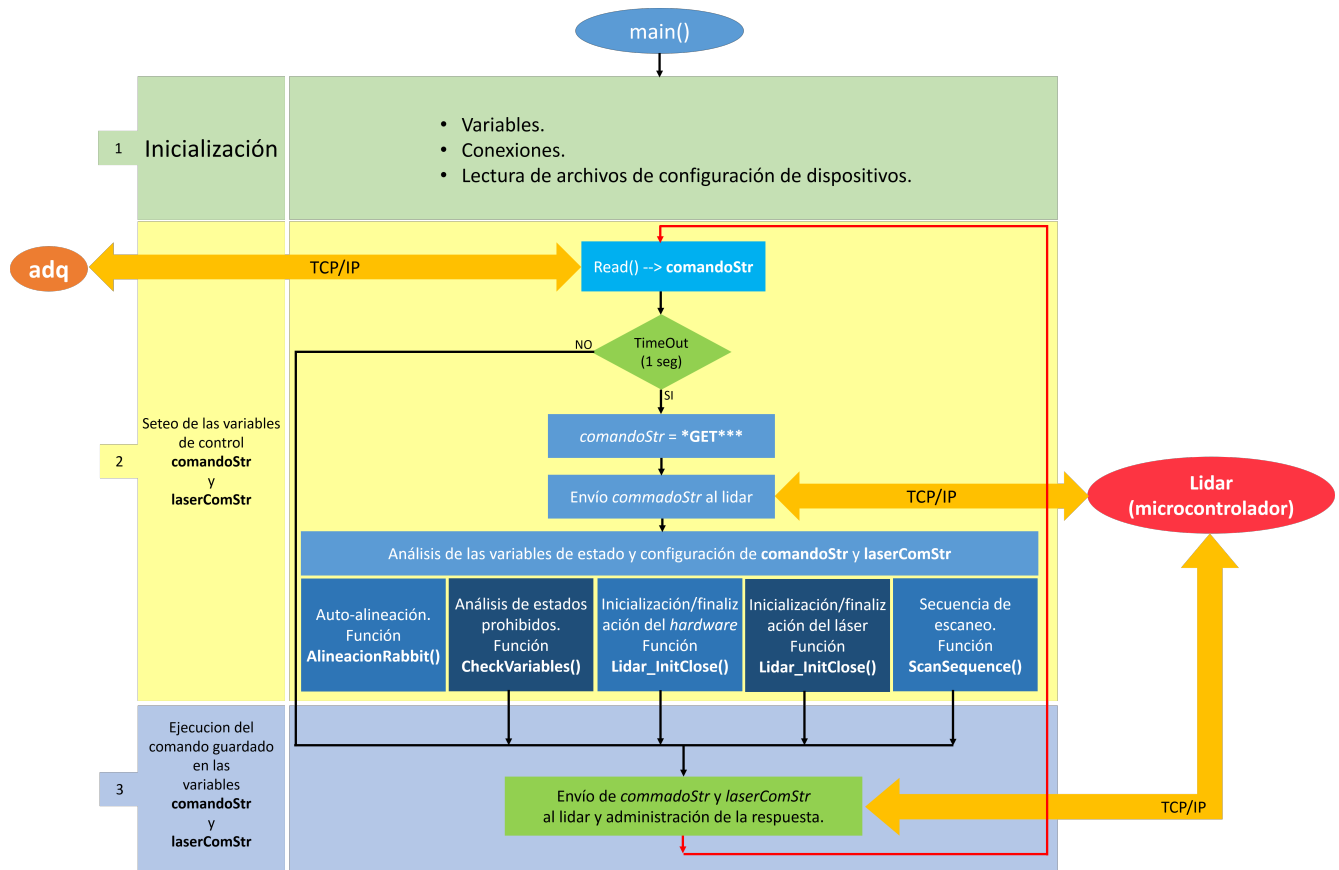


Figura 5.4.5: Diagrama de flujo general del proceso **lidarTask**.

Cada una de las etapas diferenciadas en el anterior diagrama serán explicadas a continuación:

1. Inicialización de variables: *shared-memory*, parámetros de escaneo, parámetros de auto-alineación, etc. Conexiones TCP/IP con **adq** y el microcontrolador.
2. Configuración del comando a enviar al microcontrolador. Estas variables constan de 2 *strings*: **comandoStr** y **laserComStr**. El formato de estos comandos fué descrito en la sección 5.3.1.2. Estos 2 *strings* funcionan como variables de control para este proceso, ya que además de ser las acciones que debe cumplir el microcontrolador, sirven también para controlar el flujo de operación del código.
3. Envío de **comandoStr** y **laserComStr** al microcontrolador y procesamiento de la respuesta.

Las etapas 2 y 3 se encuentran en un *loop* controlado por estas variables de control, las cuales, bifurca la ejecución del programa en función de la acción a ejecutar. Este *loop* es el corazón del programa, el cual puede estar comandada por el proceso **adq** o por **lidarTask** a través de los *shared-memory*. A continuación una breve descripción de cada etapa.

5.4.2.1. Etapa 1. Inicialización del proceso: configuración de variables y conexiones

Un detalle de esta primera etapa incluye:

- Lectura de los archivos que contienen los parámetros de configuración para la auto-alineación (**AlignmentParameters.conf**) y escaneo (**scanParam.conf**). La carga de información de estos dos procedimientos por medio de archivos permite un mayor dinamismo, adaptando dicha configuración a necesidades particulares, sin necesidad de recompilar el código.

Los detalles del archivo de configuración **AlignmentParameters.conf** se profundizarán en el capítulo 6, mientras que **scanParam.conf** se dará en la sub-sección 5.4.2.4 de este capítulo.

- Configuración de los *sockets* correspondientes a la conexión con el proceso **adq** y con el microcontrolador en el lidar.
- Configuración de las variables *shared-memory* compartidas con **adq**. Estas permiten el intercambio de información entre estos dos procesos de una manera muy efectiva, evitando en *handshaking* de una comunicación en situaciones en donde no es necesario. Son utilizadas para que **lidarTask** informe a **adq** el estado del lidar, y para que **adq** informe a **lidarTask** qué tarea está realizando o la inicialización de algún proceso. Estas variables compartidas son:

Variable <i>shared-memory</i>	Función
shmAdqTask	Controla la tarea del proceso de adq . Ver cuadro de la figura 5.4.1 donde se listan sus diferentes valores. Puede ser modificada por ambos procesos.
shmIsAcq	Modificado sólo por adq , la cual, indica si el Licel está tomando datos.
shmScan	Modificada sólo por adq para comunicarle a lidarTask si se debe adquirir en modo multiángulo.
shmLidarStatus	Estructura en la cual lidarTask guarda las <i>variables de estado</i> transmitidas por el microcontrolador.

Cuadro 5.4.3: Variables del tipo *shared-memory* compartidas entre los procesos **adq** y **lidarTask**.

Luego de esto, el proceso entra en un *loop* que involucra las etapas 2 y 3, las cuales se encargan de setear los comandos a enviar al microcontrolador y ejecutarlos.

5.4.2.2. Etapa 2. Configuración de variables de control: comandoStr y laser-ComStr

La tarea principal de este proceso es mantener actualizadas las *variables de estado* del lidar por medio del envío del comando correspondiente hacia al microcontrolador (comando ***GET*****, ver apéndice B). Luego del envío de este comando, y con el estado del lidar actualizado, las analiza para actuar en consecuencia, atendiendo procesos automáticos o solucionando estados prohibidos. Las variables de estado recibidas son almacenadas en

variables del tipo *shared-memory* compartidas con el proceso **adq**, para de esta manera estar actualizado del estado del lidar. Estos estados están relacionados con la seguridad del sistema como de los operadores que puedan estar cerca del lidar en caso de mantenimiento. El análisis de estos estados junto con las decisiones tomadas por *el software* es analizado en la sección 5.5.3. Este análisis de las *variables de estado* (segunda etapa, cuadros azules de la figura 5.4.5), sólo se encargan de configurar los *strings* **comandoStr** y **laserComStr** en función de la tarea definida por las *variables de estado* recientemente actualizadas. Luego, en la tercera etapa, se envían los comandos al microcontrolador y se analizan las respuestas.

En caso de que el proceso **adq** requiera enviar un comando al microcontrolador, solo tiene que enviarlo a **lidarTask**, para que éste se encargue de la tarea. El formato de estos *strings*, es el mismo que se utiliza en la comunicación entre **lidarTask** y el microcontrolador, los cuales, fueron abordados en la sección 5.3.1.2. Esto permite que el tratamiento de la información recibida desde **adq**, y que tengan como destinatario al microcontrolador, sea la misma que si fue generada dentro de **lidarTask**. En el diálogo que mantienen estos dos procesos, existe solo un comando que no es re-transmitido de manera directa hacia el lidar, el cual es identificado por su *header*: ***ALIGN***. Este comando es enviado durante el proceso de auto-alineación de los telescopios, e intervienen de manera sincronizada los procesos de **adq**, **lidarTask** y el microcontrolador. Este procedimiento es administrado por la función **AlineacionRabbit(...)**, la cual, llena el *string* **comandoStr** con los comandos correspondientes a los motores en el proceso de auto-alineación. Esta secuencia será explicada detalladamente en el capítulo 6

Esta segunda etapa comienza con la lectura del *socket* de la conexión con **adq**, la cual, llena la variable **comandoStr**. Esta conexión está configurada con un *time-out* de 1 segundo, donde en caso de cumplirse este tiempo sin una orden por parte de **adq**, la variable **comandoStr** será llenada por el proceso **lidarTask**. El valor a llenar en esta situación es el del comando correspondiente a la obtención del estado general del lidar: *header* ***GET***** (ver apéndice B para una descripción detallada de este comando). De esta manera, se tendrá conocimiento permanente del estado del lidar, actualizando sus *variables de estado* con un período de 1 segundo. Estas variables, al ser del tipo *shared-memory* y compartidas con el proceso **adq**, logran mantenerlo informado del estado del sistema casi simultáneamente con **lidarTask**.

En la variable **comandoStr** se almacenarán los mensajes referidos a la operación general del lidar, como la activación de diferentes dispositivos, control de motores u obtención del estado general del sistema. Los comandos dirigidos hacia el láser son guardados en la variable **laserComStr**, el cual, también es configurada convenientemente por este proceso, ya que es quien posee las secuencias de operación del láser. El hecho de tener en variables separadas los comandos hacia el láser y hacia el lidar, permite tener la posibilidad de enviar ambos en un mismo *loop* (en caso de ser necesario).

Estas *variables de estado* (descritas en la sección 5.3.1.1), son almacenadas en una estructura llamada **LidarStatus**, generando un ordenamiento más claro de los datos. A continuación, en el algoritmo 5.1 se da la definición de la misma.

Algoritmo 5.1 Definición del tipo de variable **LidarStatus**, donde se almacenan todas las *variables de estado* del lidar.

```
1 typedef struct {  
2     int      iLaserStatus ;  
3     int      iLaserTemp  ;  
4     int      mbRelayStatus ;  
5     int      mbSensorStatus ;  
6     int      iLidarStatus ;  
7     int      iMotorStatus ;  
8     int      iDecZenithValue ;  
9     int      iDecAcimuthValue ;  
10 } LidarStatus ;
```

Esta variable está definida en la librería **licel_adq.h**, la cual está incluida también en el proceso **adq**. En cada uno de estos procesos, se define la variable **shmLidarStatus** del tipo **LidarStatus**, la cual se le aplica el procedimiento para transformarla en *shared-memory*.

Luego de la actualización de las *variables de estado*, se procede a verificar la existencia de estados prohibidos, como también la existencia de procesos automáticos en ejecución. Estos procedimientos pueden ser:

- Verificación de la coherencia de las variables de estado, por medio de la función **CheckVariables()**. Esto permitirá, en caso de detectar algún problema, ejecutar el proceso de restauración correspondiente.
- Inicialización/finalización del *hardware* del sistema, administrado por la función **Lidar_InitClose()**. Esta función llena la variable **comandoStr** en la secuencia correcta para el encendido ordenado de los diferentes equipos.
- Inicialización/finalización del láser, administrado por la función **Laser_InitClose()**. Esta función es la encargada de llenar el *string* **laserComStr**, en la secuencia correcta en función del estado del láser.
- Escaneo acimutal y cenital, administrado por la función **ScanSequence()**. Esto consta del envío de comandos hacia el motor (*header *MOTOR**) en la secuencia correcta para el escaneo del sistema.

Todas estas funciones, sólo se encargan de llenar la variable de control correspondiente (**comandoStr** o **laserComStr**) en la secuencia correcta. De esta manera, al retornar de cada función, sin importar cual sea, se pasa a la etapa 3 de este proceso. En esta etapa, se envían los comandos almacenado en los vectores **comandoStr** o **laserComStr** y se procesa su respuesta en función del *header* enviado.

5.4.2.3. Etapa 3. Ejecución de comandos

En esta etapa, las variables **comandoStr** y **laserComStr** ya contienen el comando correspondiente a ser enviado, con lo que solo resta transmitirlos al microcontrolador y procesar su respuesta. Este envío es realizado por la función **SendToRabbit(...)**, la cual,

se encarga de enviar el *string* **comandoStr** o **laserComStr** pasado como parámetro, y almacenar la respuesta recibida. Esta respuesta es almacenada en el vector **dataRabbit**, el cual es un *string* de caracteres de igual tamaño que los *strings* enviados (100 bytes). A continuación se procede al procesamiento de la información, la cual es interpretada en base al comando que se envió por medio del análisis de su *header*. Esto significa que se puede continuar enviando otro comando (como parte de un proceso automático en el siguiente *loop*), o simplemente guardar las variables en los *shared-memory* correspondientes para informar a **adq** acerca del nuevo estado del sistema.

Este *loop* entre las etapas 2 y 3 se ejecuta constantemente hasta recibir por parte de **adq** el comando de finalización de la toma de datos (*header* ***BYE*****).

5.4.2.4. Protocolo de escaneo

Para que la adquisición sea realizada en modo multiángulo, debe estar activada la opción “**Scan**” en la interfaz gráfica del proceso **adq** (figura 5.4.3). La adquisición, en caso de ser necesario, podrá llevarse a cabo para ángulos cenitales/acimutales fijos, simplemente dejando este *check-box* sin tildar. El método correspondiente que se ejecuta al tildar el *check-box* “**Scan**” de la interfaz gráfica solo se ocupa de modificar el *string* **shmScan** con las cadenas “***YES***” o “***NO***”, en función de como quede activado. El código de este procedimiento es muy simple, como se observa a continuación en el algoritmo 5.2.

Algoritmo 5.2 Método correspondiente al presionar el *check-box* “**Scan**”. Su función es averiguar el estado actual de la variable **shmScan**, para configurar su valor opuesto.

```

1 void MyMainFrame::ScanBtn()
2 {
3     if ( strcmp( shmScan, "*YES*", 5 ) == 0 )
4         sprintf( shmScan, "*NO*" );
5     else if ( strcmp( shmScan, "*NO*", 5 ) == 0 )
6         sprintf( shmScan, "*YES*" );
7 }
```

La variable **shmScan** es configurada en el inicio del proceso **adq** con la cadena de caracteres “***NO***”, quedando a cargo del operador que la adquisición sea del tipo multiángulo. Sin embargo, para que el proceso **lidarTask** de curso al procedimiento de escaneo, se deben dar las siguientes condiciones, por medio de sus correspondientes variables:

- *Check-box* “**Scan**” tildado en el proceso **adq** (**shmScan**=“***YES***”, ver cuadro 5.4.2).
- Adquisición ejecutada por medio del botón “**Start ACQ**” de la interfaz gráfica de **adq**. (**shmAdqTask**=“**STRN**”, ver cuadro 5.4.1).
- Que la electrónica de adquisición no esté tomando datos en el instante de mover la estructura (**shmIsAcq**=“**NO***”, ver cuadro 5.4.3).

En caso de cumplirse estas 3 condiciones, se ejecuta la función **ScanSequenece(...)**. Esta función se encarga de configurar el vector **comandoStr** con formato correspondiente: *header*=***MOTOR***, seguido de los parámetros correspondientes al motor, dirección y ángulo necesario. Además, es la responsable de seguir la secuencia correcta en función de las coordenadas acimutal/cenital actuales, y de los parámetros de escaneo definidos en el archivo de configuración. Un ejemplo de escaneo típico se observa en el algoritmo 5.3.

Algoritmo 5.3 Archivo de configuración **scanParam.conf**, el cual, contiene los parámetros de escaneo del sistema.

```

1  [HOME]
2  zenithHome=-200
3  acimuthHome=0
4  [SCAN_PARAMETERS]
5  [SCAN_INIC]
6  zenithInic=-200
7  acimuthInic=0
8  [SCAN_DIRECTION]
9  zenithDir=0
10 acimuthDir=0
11 [SCAN_STEPS]
12 zenithStep=100
13 acimuthStep=100
14 [SCAN_ENDS]
15 zenithEnds=500
16 acimuthEnds=500

```

Este archivo posee en cada coordenada el valor de las cuentas entregadas por el *encoder* correspondiente a cada eje. Para su ordenamiento, posee delimitado por *tags* los diferentes parámetros necesarios para realizar el escaneo. Para una idea del signo de los mismos, se muestra en la figura 5.4.6 un esquema con el sistema de referencia utilizado.

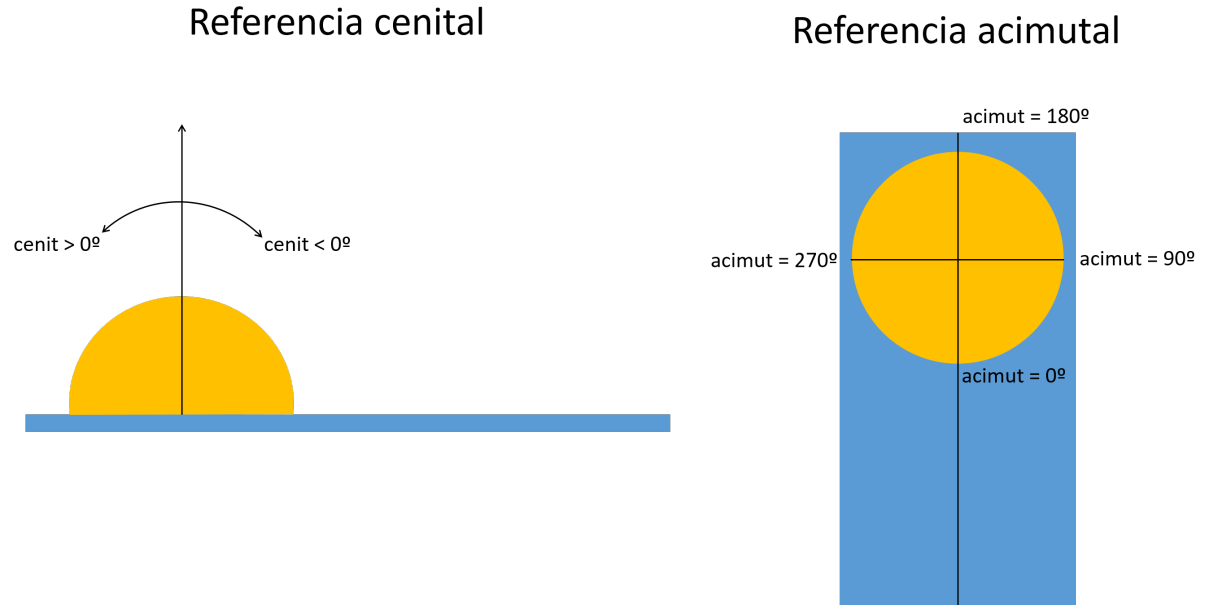


Figura 5.4.6: Referencia del sistema de coordenadas cenital-acimutal. En celeste se representa al contenedor, y en naranja el escaneo del lidar junto con la referencia usada de sus coordenadas.

En el archivo **scanParam.conf** se guardan los parámetros que definen un escaneo, formado por: la posición acimutal/cenital de inicio ([**HOME**]), la dirección inicial del escaneo ([**SCAN_DIRECTION**]), diferencia de cuentas del encoder entre dos posiciones consecutivas de medición ([**SCAN_STEPS**]) y sus límites máximos ([**SCAN_LIMITS**]).

La definición de la función **ScanSequence(...)**, se observa en el algoritmo 5.4.

Algoritmo 5.4 Definición de la función **ScanSequence(...)**, encarga de administrar el escaneo del lidar.

```
int ScanSequence( int iDecZenithValue , int iDecAcimuthValue ,
                  ScanParam strcScanParam )
```

donde los parámetros pasados son:

- **iDecZenithValue** y **iDecAcimuthValue**: valores cenital y acimutal entregados por los encoders de los motores de escaneo. Estos valores son parte de las *variables de estado* (ver cuadro 5.3.1.1) obtenidas por **lidarTask** ante el envío del comando correspondiente.
- **strcScanParam**: estructura la cual posee los parámetros de escaneo extraídos del archivo **scan.conf**. La lectura de este archivo y la carga de sus parámetros dentro de los campos correspondientes a esta estructura, es realizada por la función **ReadScanParameters("scanParam.conf", &strcScanParam)**. A esta función, se le pasa el nombre del archivo de configuración (**scanParam.conf**), junto con la dirección de la estructura para cargarle los datos. A continuación se muestra la definición de la variable tipo estructura **ScanParam**, la cual posee en su interior los parámetros de escaneo. Su definición se muestra en el algoritmo 5.5.

Algoritmo 5.5 Definición de la variable tipo **ScanParam**, la cual contiene todos los campos definidos en el archivo **scan.conf**.

```
1 typedef struct {
2 // [HOME]
3     int                zenithHome ;
4     int                acimuthHome ;
5 // [SCAN_INIC]
6     int                zenithInic  ;
7     int                acimuthInic ;
8 // [SCAN_DIRECTION]
9     int                zenithDir   ;
10    int                acimuthDir  ;
11 // [SCAN_STEPS]
12    int                zenithStep  ;
13    int                acimuthStep ;
14 // [SCAN_LIMITS]
15    int                zenithEnds  ;
16    int                acimuthEnds ;
17 } ScanParam ;
```

Por lo tanto, **ScanSequence(...)**, llena **comandoStr** en función de las coordenadas acimutal/cenital actuales, y los parámetros de escaneo recibidos como parámetros.

La secuencia de escaneo es realizada a lo largo de todo el plano cenital (dentro de los límites **zenithInic** y **zenithEnds**) para un ángulo acimutal fijo. Al concluir, se procede a realizar un paso en el ángulo acimutal (**acimuthStep**), para luego proceder nuevamente con el barrido cenital. Todo este procedimiento es realizado dentro de los límites **acimuthInic** y **acimuthEnds**.

Una característica importante de la función **ScanSequence(...)** es la versatilidad con la que puede interpretar el archivo **scan.conf**. Esto significa que, en caso de que los límites iniciales y finales de las coordenadas cenitales/acimutales sean los mismos, la función se encargará de llevarlo a esa posición para que se adquiera en ángulo fijo.

5.4.2.5. Inicialización/finalización automática del lidar

Previo al inicio de la toma de datos, es necesario la puesta a punto del *hardware*, desde la apertura del contenedor-cúpula, hasta el encendido e inicialización del láser. De la misma manera, al finalizar la adquisición, es necesario del correcto cierre del sistema, dejando todos los equipos en condiciones para la próxima adquisición. Estos procedimientos pueden ser realizados en forma automática como manual, ambos disparados por el operador desde un navegador web accediendo a las interfaces HTML del microprocesador (ver sección 5.3.2).

Los procedimientos manuales son realizados desde de la interfaz web del administrador (**indexADMIN.html**), ya que se tiene acceso al control de cada relé y comando del láser. Para esto, es necesario seguir un orden en la ejecución de los mismos, activando secuencialmente los diferentes equipos en función de información entregada por los sensores.

La forma automática de realizar estos procedimientos es desde la interfaz web **indexSHIFTER.html**, por medio de los botones **SHELTER STARTUP** o **SHELTER SHUTDOWN** (ver en la figura 5.3.2). Estos controles, poseen funciones CGI asociadas, las cuales solo se encargan de modificar la *variable de estado* **iLidarStatus** del microcontrolador con el valor **LIDAR_INIT** o **LIDAR_CLOSING** según corresponda (ver cuadro 5.3.6). El procedimiento de inicialización/finalización comenzará cuando **lidarTask** actualice sus *variables de estado* con el próximo comando ***GET***** (ver apéndice B), obteniendo el nuevo valor de **iLidarStatus**. Esto disparará el proceso pedido, enviando los comandos en el orden correcto.

Como se observa en la figura 5.4.5, luego de cada comando ***GET*****, se verifica (entre otros estados) si se tiene en curso algún proceso de inicialización/finalización, tanto del lidar como del láser. Es aquí donde se chequea si el valor de la variable **iLidarStatus** posee algún valor correspondiente a **LIDAR_INIT** o **LIDAR_STATUS**. En caso de dar afirmativo, se llama a la función **Lidar_InitClose()**, la cual se encarga de administrar estos procedimientos. Esta función, al igual que **ScanSequence(...)**, solo se encarga de llenar el *string* **comandoStr** en la secuencia correspondiente. Un resumen de las tareas de la inicialización del lidar se lista a continuación:

1. Activación del relé correspondiente a la bomba de los cilindros para la apertura del contenedor.
2. Activación del relé correspondiente a la apertura del contenedor.
3. Activación del relé correspondiente al sistema de refrigeración del láser.
4. Activación del relé correspondiente al láser.
 - a) Esto disparará la secuencia de inicialización del láser, configurando la variable **iLaserStatus** con el valor **LASER_INIT**. Cuando **lidarTask** detecte este valor en el próximo *loop*, la función **Laser_InitClose()** será invocada, encargándose de administrar la inicialización del láser por medio de la configuración del *string* **laserComStr**.
5. Activación del relé correspondiente a la fuente de los fotomultiplicadores y placa de adquisición.
6. Ubicación de la plataforma de escaneo en las coordenadas acimutal/cenital correspondientes al inicio de la medición.

Por simplicidad, en esta lista no se ha detallado el chequeo continuo del estado de los sensores. Esto debe ser realizado ya que, en algunas ocasiones, no se puede activar un relé si no se cumplió una condición anterior de determinados sensores. También, por ejemplo, una vez abierto el contenedor (y censado esta posición por el fin de carrera correspondiente), se debe desactivar el relé de la bomba de los cilindros para que no quede encendida sin ser utilizada.

En cuanto a la inicialización/finalización del láser, se sigue el procedimiento detallado en su hoja de datos. La puesta a punto de este dispositivo puede separarse en dos etapas: configuración del modo de funcionamiento, e inicialización. En cuanto al modo de funcionamiento para este trabajo, se configura al láser con las siguientes características:

1. Configuración de la frecuencia de disparo, definida a su valor nominal de 50 hz.
2. Configuración del modo de control de la lámpara flash y el *Q-Switch*. Este parámetro es definido en modo interno, lo que significa que el láser genera sus propias señales de sincronismo. La señal del *Q-Switch* posee una salida externa para ser utilizada para el disparo de la electrónica de adquisición.
3. Configuración del *Q-Switch Delay* en 200 ms, el cual provee un mayor aprovechamiento de la energía del cristal.
4. Configuración del divisor del *Q-Switch* en 1.
5. Configuración de la tensión de la lámpara *flash*, definida en su valor nominal de 1300 V.

Finalizado esta etapa, se procede a inicializar el láser, dejándolo en condiciones de lasear. Esto consta de 3 etapas:

1. Pasar el láser a modo *stand-by*. En este modo inicia la circulación interna del agua des-ionizada, la cual termaliza el cristal a su temperatura nominal de trabajo. Este procedimiento tarda aproximadamente unos 10 minutos, por lo que se tiene que se verificar la temperatura del láser constantemente. Una vez llegado a su temperatura nominal de 50°C, se pasa al siguiente estado.
2. Encendido de la lámpara flash.
3. Encendido del *Q-Switch*.
4. Apertura del *shutter*.

Todos estos estados del láser son configurados por medio de comandos enviados desde el proceso **lidarTask**, los cuales están administrados por la función **Laser_InitClose()**. Por lo tanto, al igual que la función **Lidar_InitClose()** configura a **comandoStr**, la función **Laser_InitClose()** se encarga del *string* **laserComStr** para luego ser enviado en la etapa 3 al microcontrolador. Una vez que el microcontrolador recibe este comando y detecta su *header* (***LASER***), lo transmite por el puerto serie hacia el láser. Luego, la respuesta es retransmitida hacia **lidarTask**, el cual, procesa la información. De la misma manera que en los estados prohibidos de los sensores-relés, el microcontrolador solo se encarga de responder hacia el láser de manera autónoma en caso de que la respuesta del mismo sea un error.

Para la finalización del láser, solo es necesario ponerlo en modo *stop*, (**iLaserStatus = LASER_STOP**) y una vez en este estado, desenergizar el relé que le aporta la tensión.

5.4.3. Proceso *plot*

Como su nombre lo indica, este proceso es el encargado de graficar las señales recién adquiridas, las cuales, son transmitidas desde el proceso **adq** por medio de un *socket* TCP/IP. El funcionamiento de este proceso es simple, con una interfaz gráfica clara, como se puede observar en la figura 5.4.7.

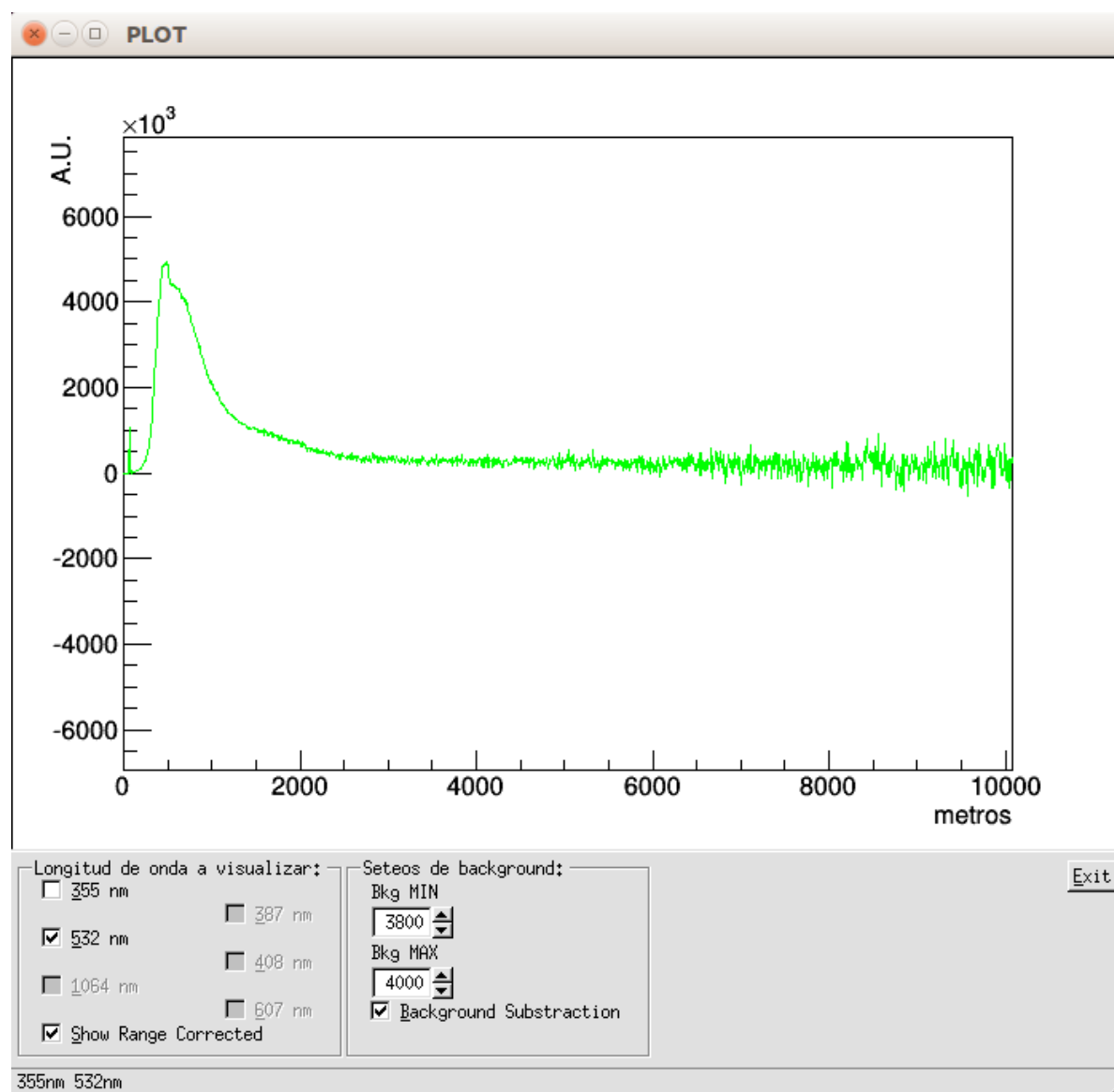


Figura 5.4.7: Interfaz gráfica del proceso **plot**, donde se puede observar la señal lidar de 532 nm.

Se observa en esta última figura controles básicos de visualización, como selectores de la longitud de onda a mostrar, rango de *bines* en los cuales se calculará el *background* de la señal lidar, y si se desea ver la señal corregida en rango. Los controles de escala en ambos ejes pueden ser realizados con gestos del mouse o bien, con el menú contextual que se despliega presionando el botón derecho sobre la figura.

Un esquema general de funcionamiento de este proceso es bastante simple, como se observa en la figura 5.4.8.

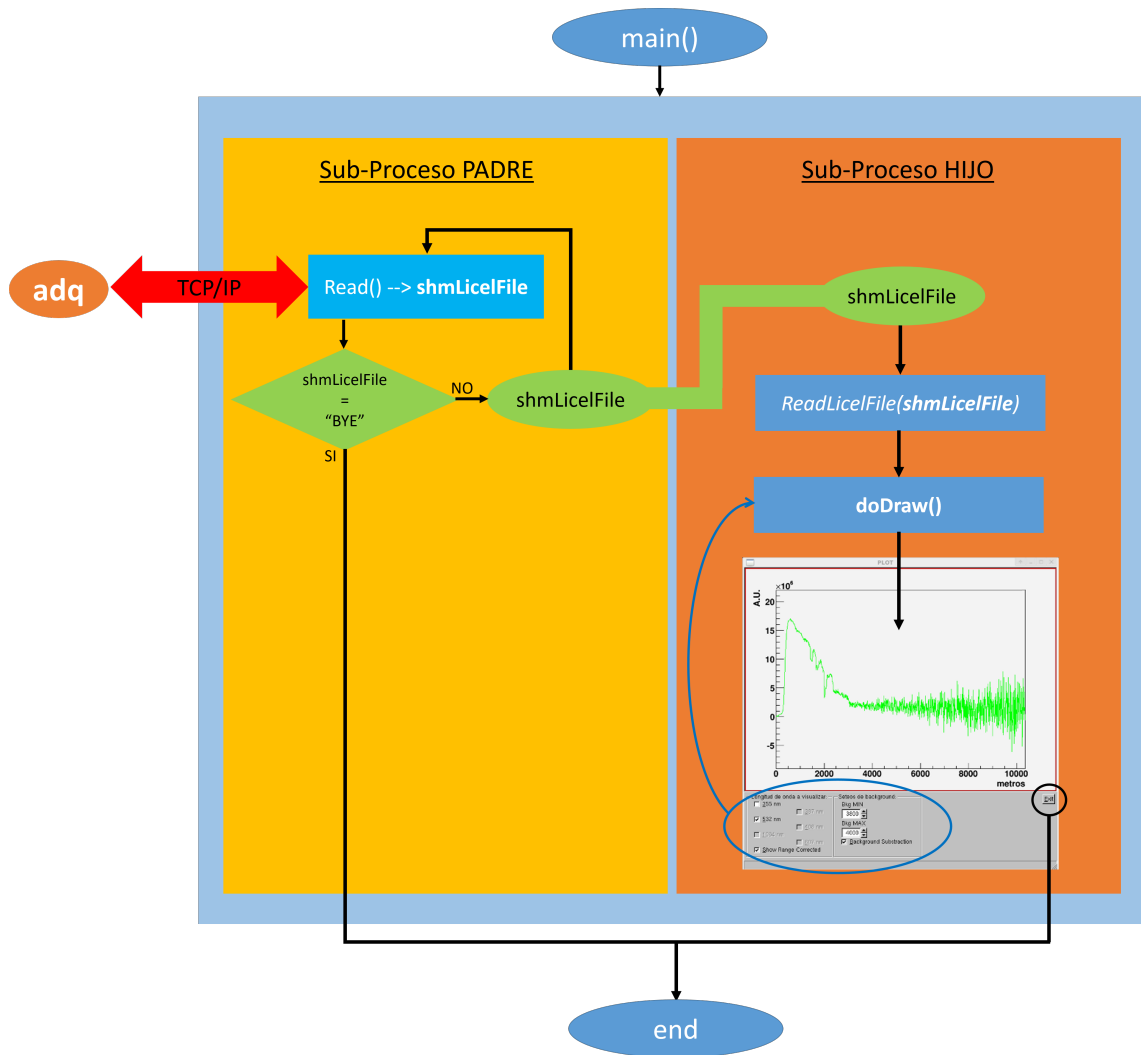


Figura 5.4.8: Esquema general de funcionamiento del proceso **plot**.

De la misma manera que **adq**, este proceso genera por medio de un *fork* un proceso *hijo* encargado de la interfaz gráfica, mientras que el *padre* administra la comunicación con **adq**, el cual, le envía el *path* del archivo recién adquirido para graficarlo. Ambos procesos se describen a continuación.

5.4.3.1. Proceso *padre*

La comunicación de este sub-proceso con **adq** es realizada por medio de una conexión TCP/IP, donde se realiza una lectura bloqueante a la espera de nueva información. Esta información puede ser: *path* a un nuevo archivo a graficar o la orden de salida. En caso de recibir un *path*, este es guardado directamente en la variable compartida con el *hijo* denominada **shmLidarFile**. De esta manera, este sub-proceso puede acceder al archivo recién adquirido para graficarlo en función de las características *seteadas* en su interfaz gráfica. El sub-proceso *padre* continúa en este *loop*, a menos que reciba por parte de **adq** el comando **"BYE"**. Cabe aclarar que este comando de salida también es copiado en la variable compartida **shmLidarFile**, para coordinar la correcta salida de ambos procesos, evitando estados *zombies*.

5.4.3.2. Proceso *hijo*

Actualizada la variable **shmLidarFile**, es procesada por medio de la función **ReadLidcelFile(shmLidarFile)**. Esta función es la encargada de leer todas las señales disponibles en el archivo, para poder ser graficadas conforme el operador seleccione en la interfaz gráfica del programa. Finalmente, los vectores adquiridos son mostrados en pantalla por la función **DoDraw()**.

Para salir de este programa, se cuenta con el botón de salida (“**Exit**”), pero también es cerrado si se termina la adquisición por medio del botón “**Exit**” del proceso **adq**. Esto es debido a que el proceso **adq** le envía el comando de cierre a todos los procesos involucrados: **plot** y **lidarTask**, donde este último, también es el encargado de transmitirle la información de cierre al microcontrolador.

5.5. Operación del lidar

Se han descrito hasta el momento el *firmware* del microcontrolador y 3 procesos que corren en la PC de Control, los cuales trabajan de manera colaborativa, comunicándose convenientemente entre sí para una correcta coordinación. De lo que se ocupará esta sección es de los pasos a seguir para el correcto uso de los mismos durante una toma de datos, tanto de manera manual como automática.

Para la operación del sistema, es importante saber que el microcontrolador siempre estará encendido, esperando una conexión con el proceso **lidarTask**. Esto debe ser así, debido que el *firmware* del microcontrolador funciona como *servidor* y **lidarTask** como cliente.

5.5.1. Inicio de adquisición

Para dar inicio a la operación del lidar, solo deberá ejecutarse el *script* **runLidarACQ** desde una terminal de la PC de Control, el cual, ejecutará de manera ordenada todos los programas para la toma de datos y control del sistema. A continuación (algoritmo 5.6) se muestra el código del mismo.

Algoritmo 5.6 *Script runLidarTask*, encargado de ejecutar en orden los procesos de **adq**, **lidarTask** y **plot**. Las líneas que comienzan con el carácter “#” son comentarios.

```
1
2 echo " "
3 echo "————— Matando procesos zombies";
4 echo " "
5 ./killProcess
6
7 sleep 2
8
9 clear
10 echo " "
11 echo "————— 'Adquisicion' ";
12 echo " "
13 # test: MODO PRUEBA, NO SE CONECTA CON EL LIDAR.
14 # acq : MODO ADQUISICION, SE CONECTA CON EL LIDAR.
15 gnome-terminal -t "ADQUISICION" -e "./adq acq"
16
17 sleep 2
18
19 echo " "
20 echo "————— 'plot' ";
21 echo " "
22 gnome-terminal -t "PLOT" -e "./plot 127.0.0.1 6969"
23
24 sleep 2
25 echo " "
26 echo "————— 'lidarTask' ";
27 echo " "
28 # test: MODO PRUEBA, NO SE CONECTA CON EL LIDAR.
29 # acq : MODO ADQUISICION, SE CONECTA CON EL LIDAR.
30 gnome-terminal -t "LIDAR TASK" -e "./lidarTask acq"
```

Este código comienza con la ejecución de otro *script* denominado *killProcess*, el cual se encarga de “matar” a los procesos antes de ejecutarlos (por medio de la instrucción *killall -9 proceso*). Esto es en caso de que alguno haya quedado en ejecución (o en estado *zombie*) de alguna corrida anterior debido a una operación defectuosa del sistema. También, puede observarse que cada proceso es ejecutado en una terminal separada, siendo invocado cada uno como parámetro al comando de *gnome-terminal*. De esta manera, los mensajes hacia el operador de cada proceso son volcados en su propia terminal, logrando un ordenamiento de la información más efectivo. También, en cada terminal, son mostrados los mensajes enviados y recibidos a otros procesos en la coordinación de las diferentes tareas. Esta información es muy útil no solo en etapa de *debugging*, si no también, para saber en que etapa de un procedimiento automática se encuentra el sistema.

Una característica particular de los procesos **adq** y **lidarTask** es que pueden ser ejecutados con un parámetro, el cual permite definir dos modos de funcionamiento. Este parámetro es una cadena de caracteres la cual puede adoptar 2 valores: *test* o *acq*. Para

el modo *acq*, el procedimiento es el normal de adquisición, conectándose con todos los dispositivos y procesos del lidar, y adquiriendo señales de la manera en la que fue explicado a lo largo de las secciones anteriores de este capítulo.

El modo *test*, fue implementado para un rápido desarrollo del *software* de la PC de Control, en el que se pueda prescindir del *hardware* del lidar encendido. En este modo, todo el funcionamiento del *hardware* es simulado, por lo que no se realiza ninguna conexión con el microcontrolador ni la electrónica de adquisición. En este modo, las respuestas del microcontrolador son simuladas, llenando los vectores correspondientes con valores pre-fijados para las diferentes respuestas.

De la misma manera, las señales lidar en este modo son tomadas de una carpeta para este fin. Su nombre es *TestLidarFiles*, y en ella se encuentran un set de señales medidas con anterioridad, las cuales son tomadas por **adq** y enviadas a **plot** de manera recursiva durante la ejecución de este modo.

Una vez que los 3 procesos se encuentran en ejecución, se deberá pasar a la inicialización del *hardware* por medio de la interfaz web, como fue descrita en la sección 5.3.2. En la figura 5.5.1, se muestra una imagen de la PC de Control en funcionamiento, en la que se pueden ver los procesos **adq**, **plot** y **lidarTask** en ejecución.

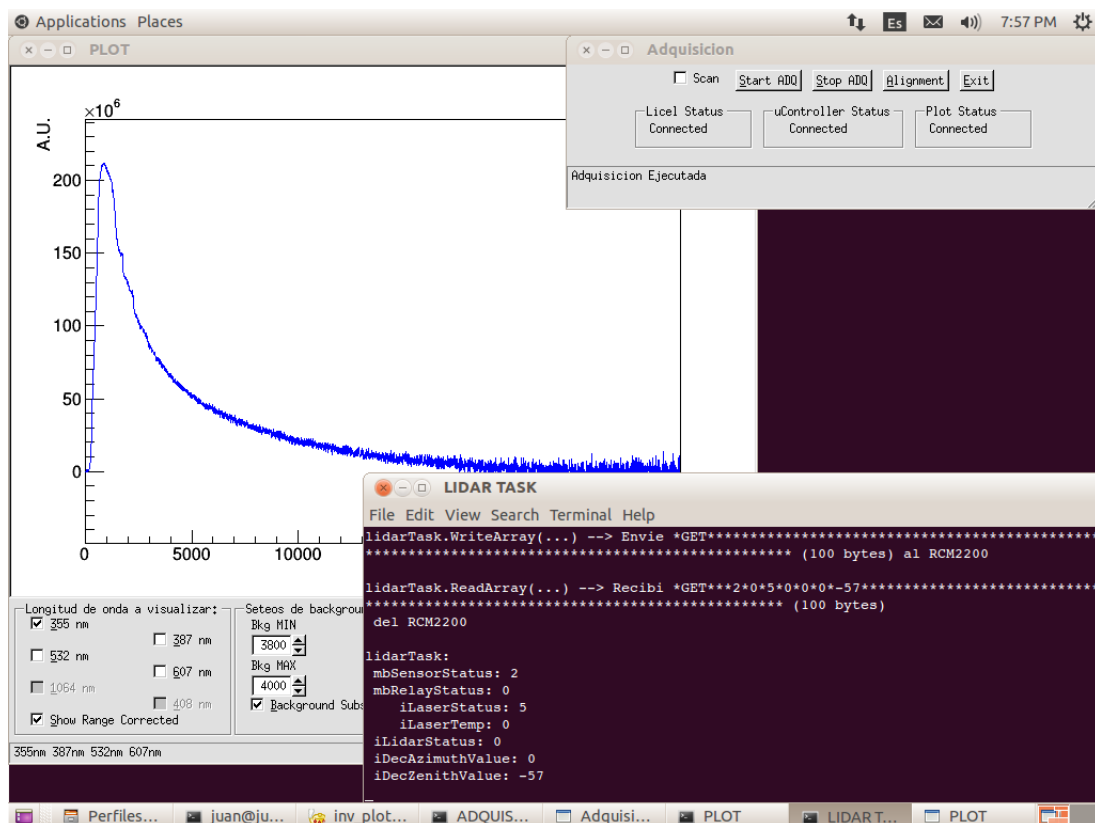


Figura 5.5.1: Procesos **adq**, **plot** y **lidarTask** en ejecución. Se observa que los dos primeros poseen interfaz gráfica, mientras que **lidarTask** sólo vuelca información en una terminal.

Se observa que el proceso **lidarTask**, como se explicó en la sección 5.4.2, no posee interfaz gráfica, pero si vuelca información de bajo nivel sobre una terminal. En ella se puede ver la información que se envía/recibe hacia/desde el microcontrolador, para un *debugging* en tiempo real.

5.5.2. Fin de adquisición

Para finalizar una toma de datos convencional, solo se deberá presionar el botón “Exit” desde la interfaz gráfica del proceso **adq**. Esto desencadenará el cierre de los demás procesos en la PC de Control. Con respecto al *hardware* del lidar, su finalización se deberá realizar por medio de la interface web, ya sea en modo manual desde **indexAdmin.html** o automático desde **indexShifter.html**, por medio del botón “Shutdown”.

5.5.3. Seguridad

Como se apuntó en algunas de las secciones anteriores, existen varias medidas de seguridad tomadas en conjunto por el proceso **lidarTask** y el *firmware* del microprocesador. Estas están basadas en el análisis de las *variables de estado* definidas en el sistema (ver sección 5.3.1), las cuales son verificadas rutinariamente para que no se produzcan estados prohibidos. Estas verificaciones son realizadas por las funciones **CheckVariables()**, las cuales existen en el *firmware* (llamada en los *co-state* 5 y 10, ver 5.3.1), y en el proceso **lidarTask** (sección 5.4.2.2). Por medio de las *variables de estado*, el sistema puede tomar decisiones de manera automática, disminuyendo los riesgos hacia el operador en caso de que se encuentre en el lugar del lidar por tareas de mantenimiento.

Los riesgos a los que esta expuesto el operador en caso de encontrarse en el lidar son de tres tipos: riesgos eléctricos, mecánicos y por manipulación de radiación no ionizante.

Riesgo mecánico:

Se observan a continuación dos posibles fuentes de riesgos mecánico:

1. Riesgos asociados al movimiento de la estructura de escaneo. En caso de realizar tareas de mantenimiento, en donde el operador se encuentra en el sitio del lidar, debe tomar precauciones en cuanto a su ubicación para evitar lesiones por atrapamientos o golpes. Estos pueden suceder en caso de encontrarse cerca del instrumento en el momento que este se encuentre realizando un escaneo. Estos riesgos son minimizados mediante capacitación del operador sobre la posición que debe tomar durante la operación del mismo en el sitio.
2. Riesgos asociados a la apertura y cierre del contenedor. En estas etapas se presentan los mayores riesgos debido a la gravedad de los mismos. Si bien la velocidad del movimiento es baja, la gravedad de las consecuencias en caso de suceder algún imprevisto obliga a que se tengan que tomar ciertos recaudos para minimizar las consecuencias. Para esto se instaló una alarma sonora indicando la apertura/cierre del contenedor, y sensores de detección humana en la zonas de peligro, permitiendo el bloqueo de determinadas acciones.

Riesgo por radiación no ionizante:

Debido a la radiación emitida por el láser, el instrumento presenta riesgo para la vista de los operarios. La minimización de este riesgo se alcanza mediante la utilización de anteojos protectores adecuados. Todo operario que trabaja con el instrumento es especialmente instruido en los riesgos a los que se expone, y en el uso adecuado de los elementos de protección personal pertinentes mediante capacitaciones.

Riesgo eléctrico

Los dispositivos y tableros eléctricos cuentan con la apropiada protección para disminuir todo riesgo eléctrico dentro de las instalaciones y se cuenta con carteles indicativos de

tensión en las protecciones o resguardos que aíslan al personal de elementos energizados. Además, todos los dispositivos energizados se encuentran puesto a tierra.

Por último, se ha señalizado el contenedor, delimitando los lugares prohibidos para la ubicación del operador cuando el láser esta encendido. Otra señalización dispuesta en el lidar son los carteles en las paredes internas de los mismos, como lo que se indican a continuación:



Figura 5.5.2: Señalización ubicada en las paredes del contenedor.

Esto es debido a que estas paredes, una vez abierto el contenedor, quedan de manera horizontal, dando lugar que puedan ser pisadas y causando la rotura de las mismas.

5.6. Conclusiones

Se describió en este capítulo los diferentes módulos del *software* desarrollado, los cuales permiten al operador realizar las mediciones con lidar Raman multiángulo. El mismo cubre los requerimientos necesarios para la toma de datos y control del *hardware* con un alto grado de automatización, como también, de manera manual. La principal filosofía en este desarrollo es que permita al operador utilizar el sistema de manera remota y con poca preparación previa. Esta característica es muy importante para el funcionamiento

dentro de los Observatorios en donde va a funcionar este lidar. Su diseño modular, de fácil *debugging* y posibilidades de expansión, permite también una adaptación a otros sistemas lidar que requieran de características similares.

También se describe la programación de *firmware* del microcontrolador, la cual poseen una lógica genérica, la que permite realizar todo tipo de tareas en el sistema. El mismo responde a comandos básicos, que permiten la realización de tareas complejas por medio de la combinación ordenada de mensajes enviados desde la PC de Control.

Las características de simpleza de operación junto con su alto grado de automatización para la toma de datos, genera un sistema novedoso para la División Lidar en la forma de adquirir los datos.

Capítulo 6

Sistema de auto-alineación lidar de múltiples telescopios

6.1. Introducción

Los sistemas lidar requieren una alta estabilidad mecánica entre el láser y los telescopios, debiendo mantener la alineación para asegurar la calidad de la señal adquirida. Desalineaciones entre estos elementos se traducen en modificaciones en el factor de *overlap* (ver ecuación 1.1.1 capítulo 1), modulando al factor atmosférico de la ecuación lidar y generando errores en su posterior análisis.

Debido a la capacidad multiángulo del lidar realizado en este trabajo, la estabilidad láser-telescopio se ve comprometida debido al movimiento acimutal y cenital. Además, la exposición del sistema a la intemperie, soportando los cambios de temperatura y cargas de viento, hacen de la alineación un parámetro crítico. Es por esto que se realizó un sistema que permita la alineación automática de cada uno de los telescopios con respecto al láser, pudiendo de esta manera, controlar la alineación y recuperarla en caso de ser necesario.

Existen diversos métodos para la obtención del factor de *overlap*. En [49], se realiza un desarrollo teórico del mismo, haciendo uso de complejas ecuaciones geométricas, mientras que en [116], se desarrolla un método práctico para la extracción de dicho factor por medio de las señales Raman. En este trabajo, se ha estudiado desde ambos puntos de vista, realizando un desarrollo propio en ambos campos (teórico y práctico), logrando una interpretación del factor de *overlap* para el control del mismo. El enfoque teórico fue implementado por medio de un *software* de simulación, basado en agentes [107], cuya descripción detallada es realizada en el apéndice A. En cuanto al relevamiento práctico del factor de *overlap*, se ha realizado un algoritmo capaz de detectar las principales características del mismo, pudiendo cuantificarlo y conocer el estado de cada telescopio. Este algoritmo, es parte del proceso **lidarTask**, que corre en la PC de Control, trabajando de manera colaborativa con **adq** (para adquirir las señales que se analizarán), y el microcontrolador, que inclina el telescopio a diferentes posiciones en la búsqueda de la alineación óptima. Los primeros resultados de este desarrollo fueron reportados en [117].

En el capítulo 4, sección 4.2.2, se explicó el desarrollo del *hardware* dedicado a la alineación de cada telescopio. Este *hardware* permite la inclinación de cada uno de los telescopios por medio de motores paso-a-paso controlados desde la PC de Control a través del microcontrolador. Este sistema de auto-alineación está basado en trabajos previos reportados en [118] y [119], cuya implementación para este sistema fue descrita en [108].

En este capítulo se comenzará repasando el *hardware* descrito en el capítulo 4, sección 4.2.2. Se continuará con la descripción del procedimiento de auto-alineación, describiendo la secuencia a realizar por cada telescopio. Se detalla el trabajo de coordinación entre los procesos intervinientes, tanto en la PC de Control como el microcontrolador. Se desarrolla los conceptos utilizados para la obtención de los parámetros óptimos en el proceso de auto-alineación, como el criterio de cuantificación del factor de *overlap* de manera indirecta, utilizando como información la señal lidar elástica adquirida.

6.2. Sistema de auto-alineación.

Hardware y software desarrollado

En este capítulo se describe el diseño del *hardware* y *software* necesarios para la auto-alineación de cada telescopio. Este sistema comienza con la implementación del *hardware* descrito en la sección 4.2.2 del capítulo 4, el cual permite el movimiento de cada telescopio con respecto al láser. Este movimiento puede realizarse de manera manual, operando los

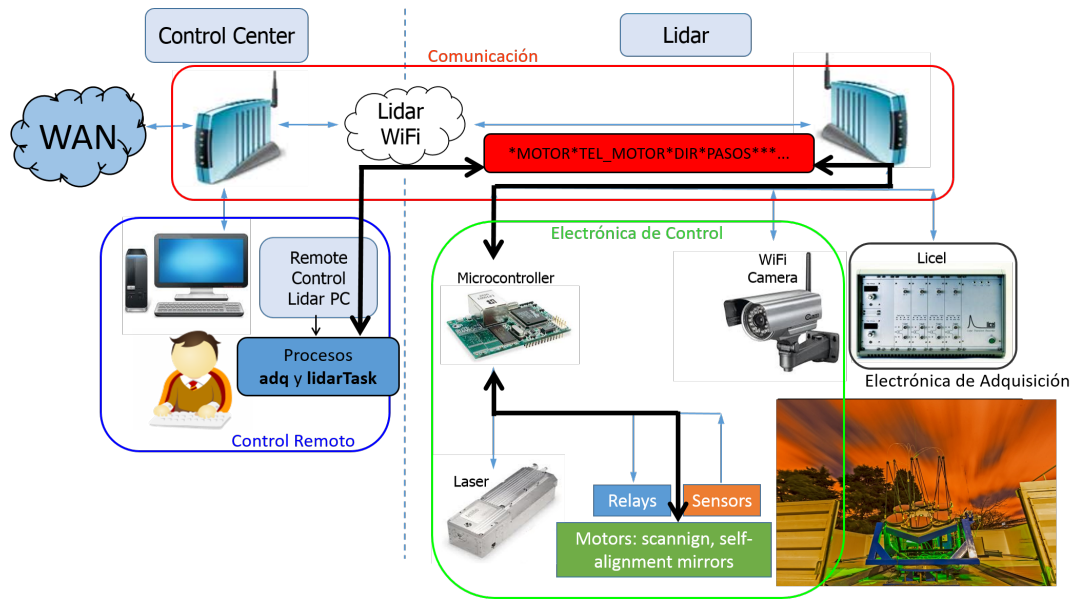


Figura 6.2.1: Esquema de los elementos intervinientes (*hardware* y *software*) en la auto-alineación de telescopios.

accionadores que dispone el sistema, como remota, por medio de los motores paso-a-paso instalados debajo de cada accionador.

Se repite para mayor claridad en la figura 6.2.1 el esquema general del lidar (figura 4.3.1 del capítulo 4), en donde se agregan los elementos intervinientes en la auto-alineación de los telescopios, así como también, el tipo de comando enviado hacia el microcontrolador en el proceso de auto-alineación.

La electrónica encargada del control de los motores fue descrita en el capítulo 4, sección 4.3.3.5. Esta electrónica está formada por una lógica de multiplexación la cual permite controlar a los 12 motores de auto-alineación, más los dos de escaneo con solo 6 líneas del microcontrolador.

Toda la lógica de este procedimiento está centrada en la PC de control, administrada por el proceso **lidarTask**, siendo el microcontrolador el encargado de accionar el motor correspondiente en la medida que se le indique.

El inicio de este procedimiento debe ser realizado de manera manual, desde interfaz gráfica del proceso **adq**, por medio del botón “**Alignment**” (ver figura 5.4.3 del capítulo 5, sección 5.4.1), el cual, dará inicio a la secuencia. Este botón solo estará disponible una vez que la inicialización del sistema haya terminado, y podrá invocarse durante cualquier momento de la toma de datos. Este dará origen al procedimiento de auto-alineación, el cual, será comandado por **lidarTask**. Este proceso estará en constante diálogo con **adq** y el microcontrolador, administrando toda la secuencia.

Se describirá en la siguiente sección la coordinación entre todos los integrantes de este sistema, y la función de cada uno en el procedimiento.

6.3. Procedimiento de auto-alineación. Operación cooperativa entre los diferentes procesos

La auto-alineación de los telescopios es una tarea cooperativa entre los procesos **adq**, **lidarTask** y el *firmware* del microcontrolador, siendo **lidarTask** quien administra todo el

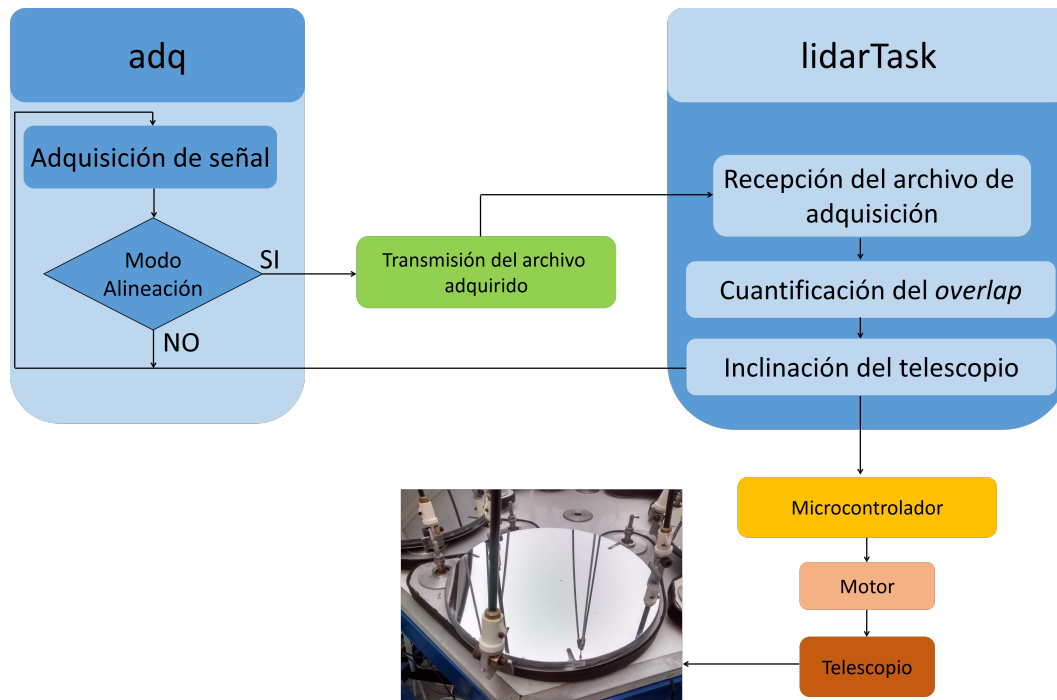


Figura 6.3.1: Diagrama de flujo del proceso de auto-alineación. Se observa la interacción entre los diferentes procesos en la PC de control, como también, su interacción con los motores de los telescopios por medio del microcontrolador.

proceso por medio de la función **AlineacionRabbit(...)** (ver figura 5.4.5 del capítulo 5). El concepto de este algoritmo se basa en adquirir señales lidar a diferentes inclinaciones del telescopio con respecto al láser, almacenando para cada posición el estado de *overlap* y el de sus motores paso-a-paso. Todo este procedimiento es llevado a cabo con el láser apuntando hacia el cenit, y bajo la suposición de que la atmósfera no cambia durante todo el procedimiento. Un esquema simplificado de este algoritmo se muestra en la figura 6.3.1.

A continuación, se dará una descripción detallada del procedimiento, y las tareas de cada proceso involucrado.

1. Proceso **adq**: Desde su interfaz gráfica, se inicia la auto-alineación por medio del botón “*Alignment*” de su interfaz gráfica. Este proceso sigue con su secuencia normal de adquisición con las siguientes modificaciones:
 - a) Se cambia el tiempo de adquisición a 5 segundos (100 disparos), para acelerar el procedimiento.
 - b) Cada archivo se guarda con el nombre *Nalineacion.jvp*, siendo *N* el número de archivo en la secuencia de alineación de cada telescopio.
 - c) El *path* de este archivo adquirido, además de enviarse al proceso **plot**, es enviado también al proceso **lidarTask**, con el header ***ALIGN***.

Este proceso continúa adquiriendo bajo esta configuración hasta la finalización del proceso de auto-alineación, comandada por **lidarTask**.

2. Proceso **lidarTask**: Recibe el comando de alineación (en la variable **comandoStr**), formado por el header ***ALIGN*** seguido del *path* al archivo recién adquirido (ver

capítulo 5, sección 5.4.2.2). Una vez detectado el *header*, llama a la función **AlineacionRabbit(...)**, la cual es la encargada de administrar este proceso, el cual consta de:

- a) Análisis del *overlap* de la señal recién adquirida. Este estudio se realiza sobre la línea elástica de 532 nm, la cual es accedida por medio del *path* al archivo recibido como argumento en la variable **comandoStr**. El método de cuantificación del *overlap* se desarrollará en la sección 6.4. Cada representación del estado del *overlap* se almacenará junto con su posición (cantidad de pasos relativos respecto al punto de partida). De esta manera, cuando se obtenga la posición de alineación mejor calificada, se tendrá la información necesaria para poder ubicar al telescopio en esa posición.
 - b) Administrar la secuencia de barrido del telescopio. Esto consta de enviar al microcontrolador los comandos para mover el motor correspondiente y en la dirección correcta. Una vez que el motor se ubica en la nueva posición, se le envía a **adq** el comando para que proceda a la nueva adquisición.
3. Microcontrolador: El microcontrolador sigue respondiendo a las órdenes de la PC de control, por lo que no entra en ningún estado especial. Por lo tanto, se encargará de responder a las órdenes enviadas por **lidarTask**. En este caso, la orden enviada es con respecto al movimiento de los motores de los telescopios. Como se representó en la figura 6.2.1, el *header* es ***MOTOR***, seguido de:
- a) Número de telescopio/motor de escaneo.
 - b) Motor dentro del telescopio/escaneo.
 - c) Dirección a la que debe moverse.
 - d) Cantidad de pasos.

Estos 3 puntos se realizan para cada uno de los telescopios hasta finalizar la secuencia, administrada por **lidarTask**. Como se puede observar, el proceso **adq** continúa con sus tareas habituales, solo que cambian algunos parámetros de la toma de datos. Por parte del *firmware*, no entra en ningún estado particular, solo continua respondiendo a las órdenes enviadas por la PC de control desde el proceso **lidarTask**.

Es necesario aclarar que, este procedimiento de auto-alineación tendrá mejores y rápidos resultados, si es lanzado sin la pérdida absoluta de señal en cada telescopio.

6.3.1. Secuencia de barrido de cada telescopio en el proceso de auto-alineación

Para una mayor claridad en la descripción del barrido de cada telescopio, se muestra en la figura 6.3.2 esquemáticamente los dos tipos de barrido a realizar durante el proceso de auto-alineación.

La secuencia de barrido sigue el siguiente orden:

1. Escaneo **Norte-Sur**, por medio del motor paso-a-paso conectado al accionador B. En el análisis de este barrido, la señal lidar será máxima en el momento en que se encuentre alineado con el telescopio, siendo las variaciones de la señal mucho más leves en comparación con el movimiento Este-Oeste.

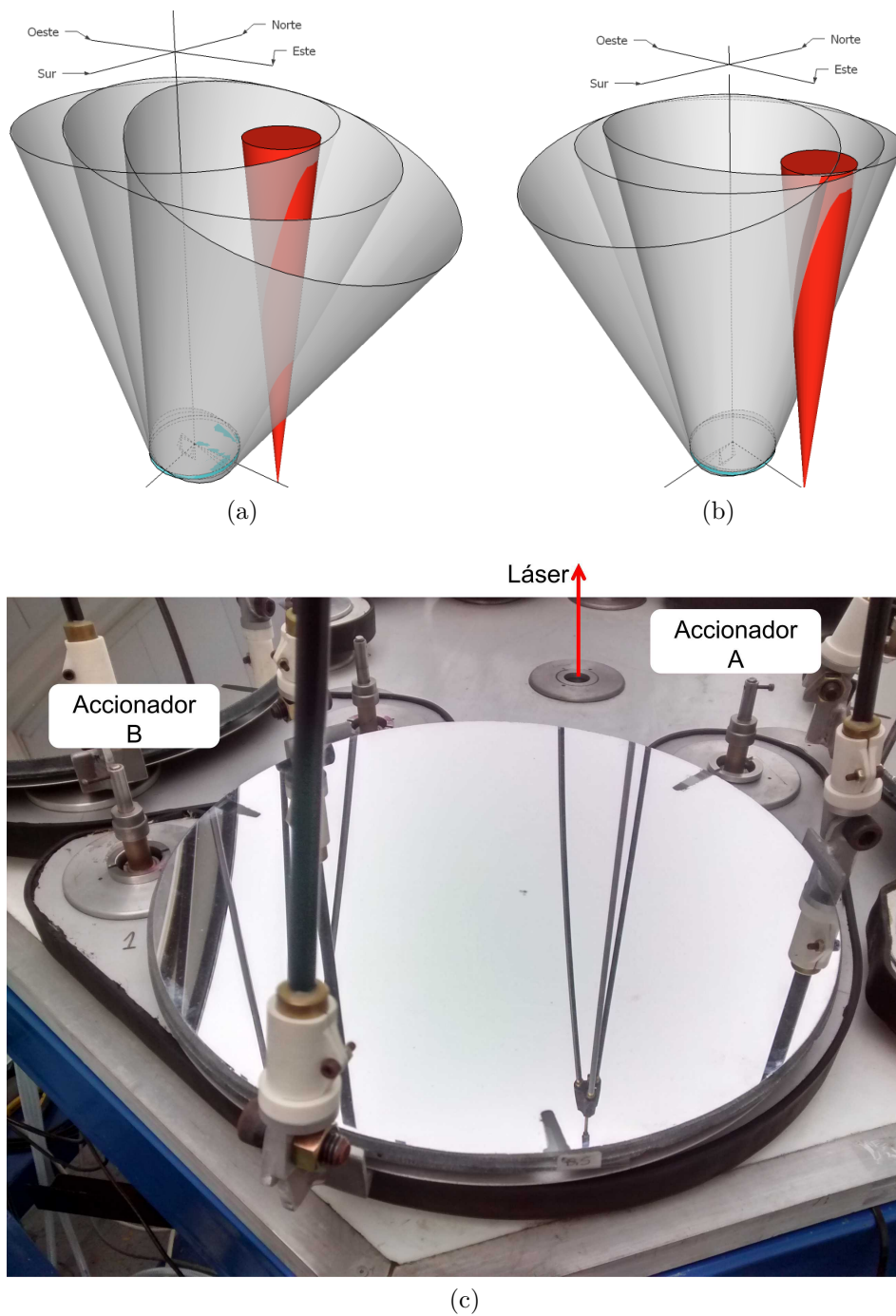


Figura 6.3.2: Representaciones esquemáticas (no en escala) de los barridos ortogonales realizado por el telescopio en el procedimiento de auto-alineación. (a) Barrido Este-Oeste, (b) barrido Norte-Sur, (c) foto de uno de los telescopios sobre su plataforma de alineación, donde se aclaran la identificación de los accionadores utilizados para cada movimiento.

2. Escaneo **Este-Oeste**, por medio del motor paso-a-paso conectado al accionador A. En esta secuencia se notarán los mayores cambios en la señal, ya que cruza/aleja el FOV con el láser, aumentando/disminuyendo la señal en la parte baja de la atmósfera. Además, bajo la acción de este barrido, se modificará en gran medida la posición del pico de la señal lidar, acercándose a zonas más bajas de la atmósfera. Esta característica será tomada en cuenta al momento de la caracterización del *overlap* (sección 6.4).

Por lo tanto, cada para cada uno de los ángulos del barrido, se adquiere la señal y se caracteriza su estado de *overlap* (ver sección 6.4). Esta información es almacenada junto con los pasos relativos realizados por cada motor, y la dirección respecto al punto de inicio. Finalizada la secuencia, se ubica al telescopio en la posición mejor calificada. Este movimiento es realizado por medio de los motores paso-a-paso instalados en cada plataforma que contiene a los telescopios (ver 4.2.2.2 del capítulo 4)

6.4. Análisis del *overlap* del sistema en función de la señal adquirida

Se describe a continuación el método de cuantificación del *overlap* por medio de la señal lidar. Este procedimiento es realizado a un ángulo cenital igual a cero, y el estado del *overlap* será cuantificado sobre la señal lidar de de 532 nm. Los valores recolectados para cada ángulo del telescopio serán analizados luego para seleccionar la mejor inclinación del mismo.

Para este estudio se han realizado simulaciones del barrido del telescopio, para obtener la alineación óptima y las características que debe cumplir la señal lidar en este estado. Estas simulaciones se llevaron a cabo con un *software* realizado para tal fin, cuya descripción detallada se encuentra en el apéndice A. Esta herramienta permite la simulación del factor de *overlap* en función de las características del lidar, las cuales, son ingresadas por medio de su interfaz gráfica. Entre estos parámetros, es posible configurar el ángulo relativo láser-telescopio, pudiendo conocer sus efectos sobre el factor de *overlap*, y por lo tanto, sobre la señal lidar.

6.4.1. Factor *overlap* óptimo en función del ángulo láser-telescopio

El factor de *overlap* óptimo es el que permita un máximo de rango dinámico en la señal lidar detectada. Esto significa lograr un *overlap* igual a 1 en rangos lo más bajos posible, manteniendo este valor en rangos lejanos. Esto es posible por medio del ángulo láser-telescopio óptimo el cual permita esta condición.

La cuantificación del estado del *overlap* por medio de la señal lidar consta de 2 partes:

1. Promedio de la señal lidar a un rango a determinar (denominado r_a , donde el sub-índice “a” es por “alineación”).
2. Registro de la ubicación del **pico** de la señal lidar.

Estas dos características son afectadas ante cualquier cambio en el ángulo láser-telescopio, por lo que el estudio de las mismas nos permite inferir el estado del factor de *overlap*. Se desarrolla en las siguientes secciones la utilización de estos datos para determinar la correcta alineación del del sistema.

6.4.1.1. Promedio de la señal en rango lejano

La información del valor medio en un rango lejano es utilizado para seleccionar la inclinación óptima del telescopio, la cual será la que posea el valor más alto. De esta manera, al maximizar la señal lidar en un rango lejano, se asegura que el valor de *overlap* en dicho rango sea igual (o lo mas cercano) a 1, ya que no puede adoptar un valor mayor.

Se muestra a continuación las simulaciones correspondientes al factor de *overlap* a una altura de alineación (r_a) de 10 *km*, para diferentes ángulos de inclinación del telescopio y ambas direcciones de escaneo: Este-Oeste y Norte-Sur. Los parámetros utilizados para la simulación son los siguientes:

Parámetro	Valor
Radio del telescopio	20 <i>cm</i>
Distancia focal del telescopio	1 <i>m</i>
Diámetro de la fibra óptica	1 <i>mm</i>
Distancia de la fibra óptica al telescopio	1 <i>m</i>
Radio inicial del láser	6 <i>mm</i>
Divergencia del láser	0,7 <i>mrad</i>
Distancia láser-telescopio	50 <i>cm</i>
Barrido telescopio-láser (Este-Oeste)	-1 a 1 <i>mrad</i>
Barrido telescopio-láser (Norte-Sur)	-1 a 1 <i>mrad</i>
Rango de análisis del <i>overlap</i> (r_a)	10 <i>km</i>

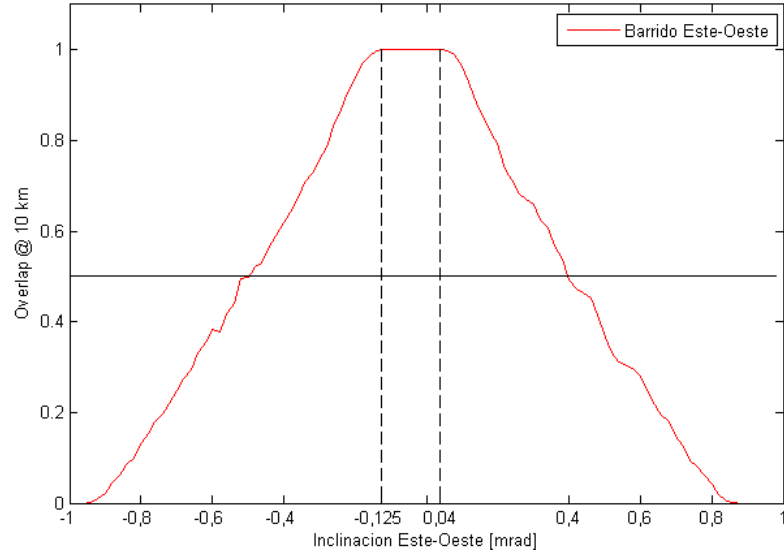
Cuadro 6.4.1: Parámetros utilizados en la simulación del factor de *overlap*.

El marco de referencia utilizado es el dado en la figura 6.3.2, donde el láser es ubicado sobre el eje Este-Oeste. Los resultado de las simulaciones del valor del factor de *overlap* a los 10 *km* se muestra en las figuras 6.4.1.

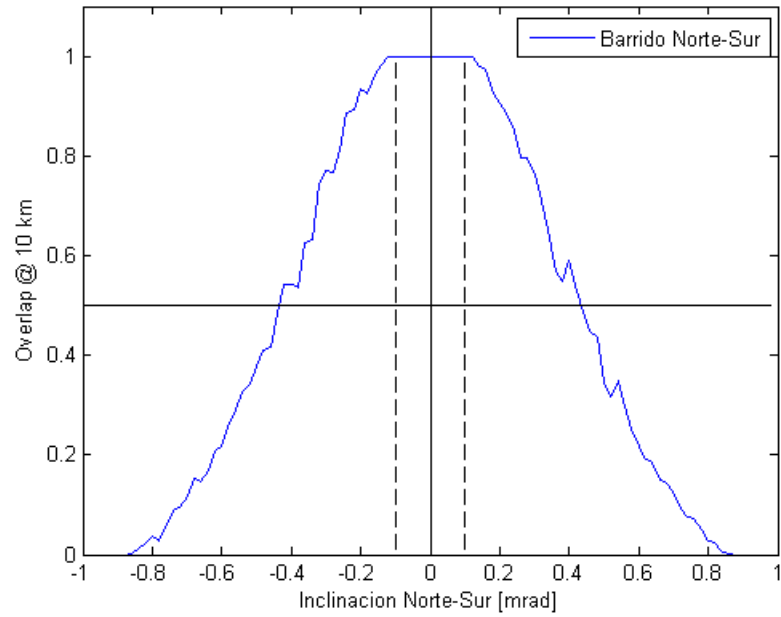
Estos valores de *overlap* modulan al resto de la señal lidar a esa altura, modificándola en la proporción indicada. Por lo tanto, eligiendo el ángulo que corresponda al máximo valor medio de la señal a esa altura, se tendrá la certeza de que el *overlap* sea también máximo. Esta es la base fundamental de la alineación lidar, y la que se aplicará en este sistema automático. Las figuras 6.4.1 nos permiten obtener información acerca de las inclinaciones teóricas óptimas que debe adoptar los telescopios con respecto del láser, logrando de esta manera un factor de *overlap* óptimo y mejorando el rango útil de la medición.

6.4.1.2. Factor de *overlap* óptimo y su corrección para mayor rango de detección

Como se observa en los gráficos “a” y “b” de la figura 6.4.1, cada barrido posee máximos con sus características particulares. En el caso del barrido sobre el eje Norte-Sur, se destaca su carácter simétrico, debido a que el láser se ubica sobre el eje Este-Oeste. En este tipo de barrido es posible encontrar una inclinación óptima del telescopio hacia el láser en



(a) Simulación del barrido Este-Oeste. Ángulos negativos representan inclinaciones del telescopio hacia el láser.



(b) Simulación del barrido Norte-Sur.

Figura 6.4.1: Simulación del factor de *overlap* a 10 km. La forma irregular de las figuras es debido al método de simulación empleado, el cual, está basado en el método Monte Carlo (ver apéndice A).

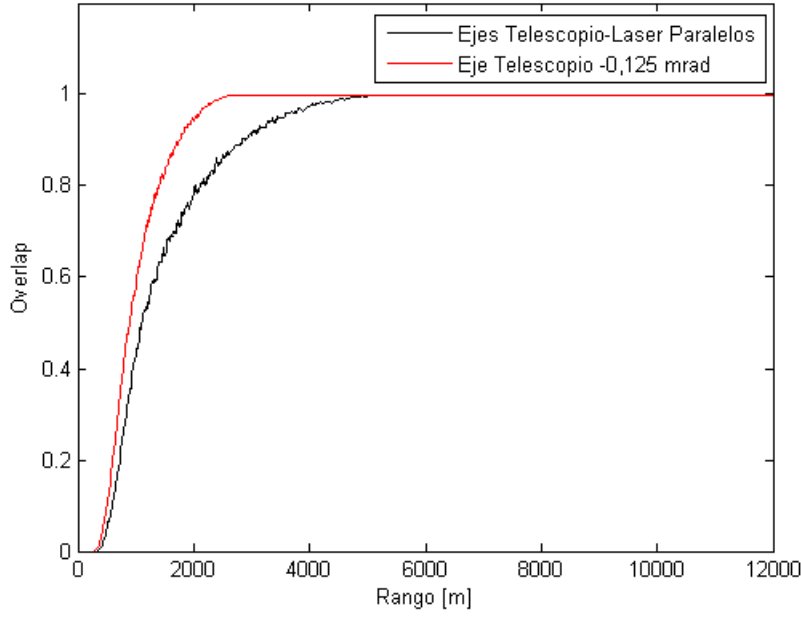


Figura 6.4.2: Comparación de las simulaciones del factor de *overlap* para dos alineaciones: ejes láser-telescopio paralelos (negro), y con el telescopio inclinado $-0,125 \text{ mrad}$ (rojo). Estas simulaciones se realizaron con el *software* realizado para este trabajo (apéndice A).

la cual se logre un *overlap* de 1 a una altura menor que en el caso de una alineación de ejes paralelos. Esto permite tener señal útil en zonas más bajas de la atmósfera, sin perder señal (o factor de *overlap*) en zonas altas. La simulación para este caso, junto con el *overlap* correspondiente para el caso de ejes láser-telescopio paralelo, se muestra en la figura 6.4.2.

Se observa en esta última figura que, con una inclinación relativa del telescopio hacia el láser de $0,125 \text{ mrad}$, se logra un factor de *overlap* igual a 1 a los 2800 m . Esta altura es mucho menor que los 5600 m que se obtendrían para una alineación de ejes láser-telescopio paralelos, sin la pérdida de señal a los 10 km . El valor de inclinación del telescopio correspondiente a esta situación es de $0,125 \text{ mrad}$, y puede obtenerse teóricamente por medio de la expresión:

$$\frac{(FOV_{tel} - divLaser)}{2} = \frac{(1 - 0,75) \text{ mrad}}{2} = 0,125 \text{ mrad} \quad (6.4.1)$$

Esta expresión es el límite de inclinación relativa láser-telescopio sobre el eje Este-Oeste, la cual asegura que una vez que el láser ingresa en el campo de visión del telescopio no salga más, asegurando un *overlap* de 1 para todo el rango de medición. Con respecto al barrido Norte-Sur, su posición óptima es la que no impone ningún ángulo entre el láser y el telescopio, centrando el láser en el medio del FOV del telescopio.

Los resultados de las simulaciones del factor de *overlap* (apéndice A) han demostrado una buena representación de la realidad en base a las señales tomadas. Por lo tanto, y para aumentar el rango dinámico de la medición, se puede corregir la señal lidar adquirida dividiéndola por el factor de *overlap* simulado [120]. Esto debe realizarse con mucho cuidado, ya que como se observa en la figura 6.4.2, en los primeros 200 m (26 bins) el factor de *overlap* es cero. Por lo tanto, para evitar estos problemas, se utiliza desde el bin número 50 (375 m) en adelante para realizar la corrección. Este proceso es muy

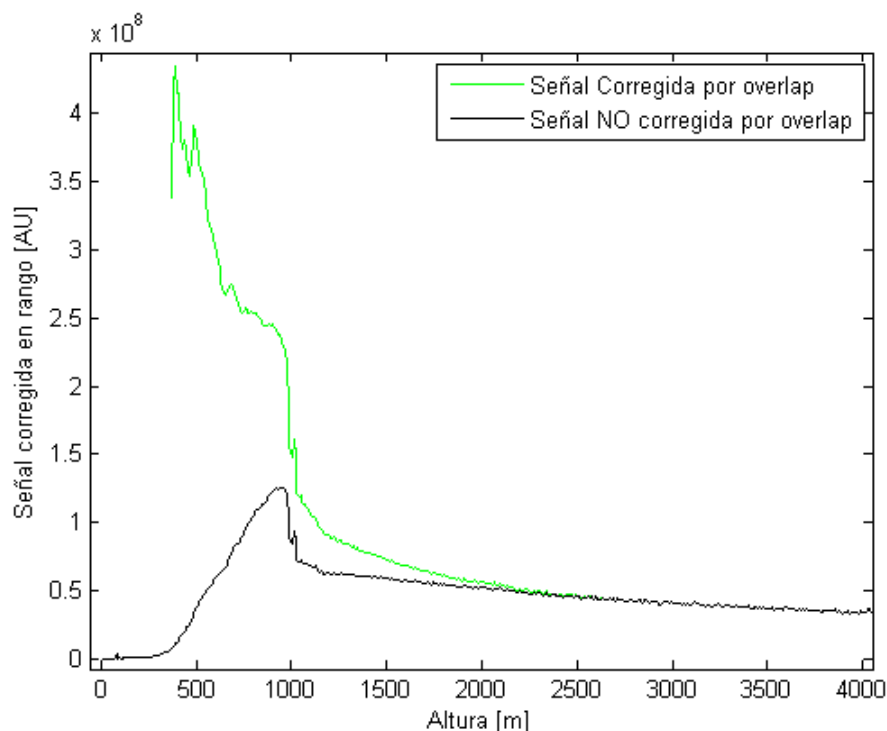


Figura 6.4.3: Señales corregidas en rango, donde se aprecia la diferencia de la corrección por factor de *overlap*.

importante para el relevo de los perfiles dentro de la capa límite atmosférica. Un ejemplo del resultado de este proceso, y de la ganancia de señal que se obtiene en zonas mas bajas de la atmósfera, se puede observar en la figura 6.4.3.

Se observa la ganancia de señal que se obtiene en la zona donde el factor de *overlap* es menor a la unidad (rangos menores a los 2800 m). En este ejemplo se resalta una estructura entre los 500-1000 m (curva verde), la cual es imperceptible en la señal sin corregir (curva de color negro). También se puede apreciar que, cuando el *overlap* es igual a 1 (desde los 2800 m aproximadamente), ambas señales son iguales. También se observa en la figura 6.4.3 que se puede recuperar la señal lidar hasta los 500 m aproximadamente. Sin embargo, en este rango es necesario dividir la señal lidar por valores muy bajos del factor de *overlap*, por lo que se opta por realizar esta corrección hasta los 1000 m. **Por lo tanto, luego de corregir la señal lidar, se define el rango útil a partir de los 1000 m.**

Todo este proceso de barrido y cuantificación del *overlap* es válido bajo la premisa de que la atmósfera no cambia en el tiempo de barrido del telescopio. Esto debe ser así para asignar los cambios del valor medio de la señal lidar a los cambios de ángulo láser-telescopio, descartando los factores atmosféricos. El tiempo total invertido para cada alineación es de aproximadamente 2 minutos por telescopio.

En esta instancia, cabe retomar la resolución angular del telescopio, descrita en la tabla 4.2.2 del capítulo 4. Se observa que para el eje Este-Oeste, se tiene una resolución de 0,0227 mrad/paso del motor, mientras que para el eje Norte-Sur, es de 0,01265 mrad/paso. Estas resoluciones son más que suficientes para la correcta ubicación del telescopio en ambos ejes.

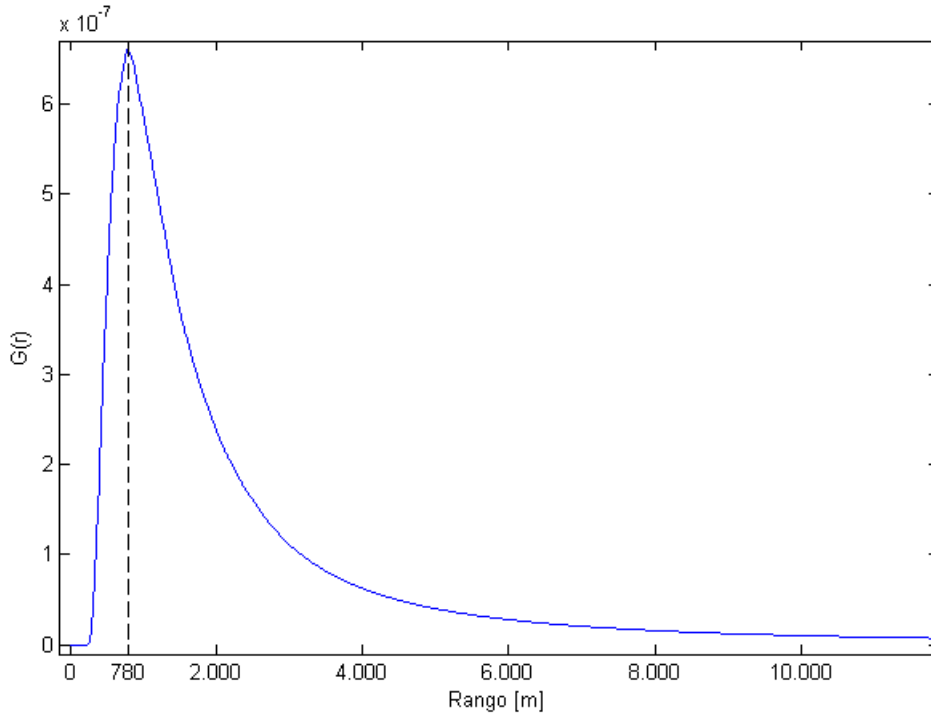


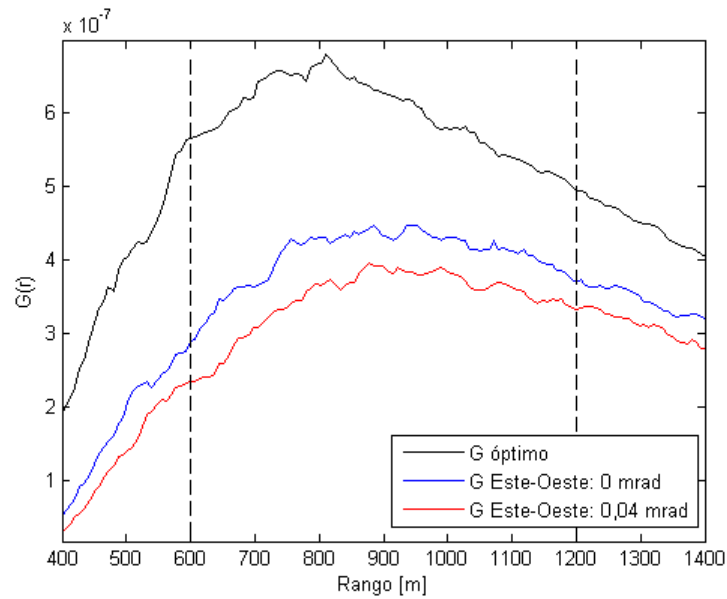
Figura 6.4.4: Simulación del factor de *overlap* dividido por r^2 , denominado por algunos autores como factor G [17]. Se observa el pico a los 780 m.

6.4.1.3. Análisis de la posición del pico de la señal lidar

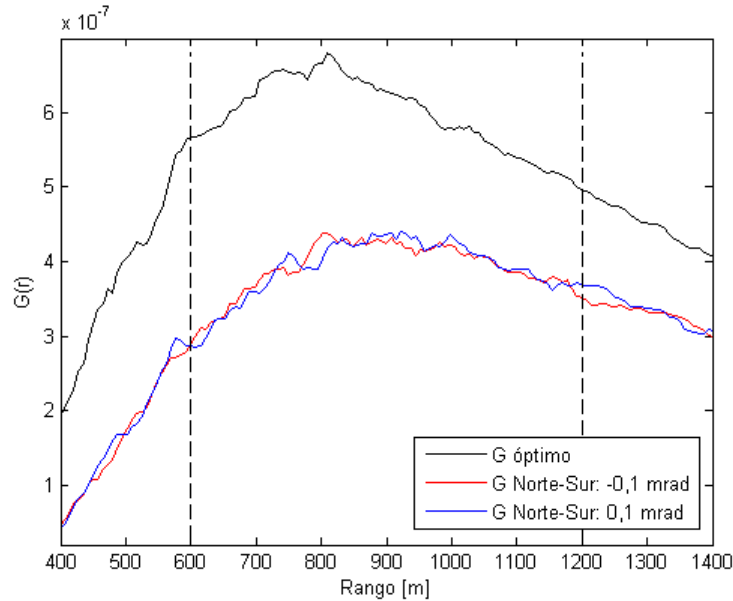
El conocimiento de la posición del pico de la señal lidar elástica es una característica distintiva de la alineación del sistema, siendo poco dependiente de las condiciones atmosféricas. Una manera aproximada de obtener esta información es dividiendo el factor de *overlap* por r^2 , ya que las condiciones atmosféricas no modifican en gran medida la posición del pico de la señal. Aplicado al *overlap* óptimo, mostrado en la figura 6.4.2, se obtiene el gráfico de la figura 6.4.4.

Esta figura contiene gran parte de la **forma** de la señal lidar elástica ($P_{el}(r)$) sin la constante de instrumental y el factor atmosférico, el cual no cambia de manera significativa la **posición** del pico. Una comprobación del poco efecto que impone la atmósfera en la posición de este pico se observa en las simulaciones realizadas en el capítulo 3. Allí se simularon las señales lidar con cargas aerosólicas extremas, dando como resultados ubicaciones en el pico de la señal lidar en los 750 m, sólo 30 m (4 bins) menos que su posición óptima. Esta característica es muy útil al momento de la alineación, ya que permite una comprobación de fácil detección la cual, de manera indirecta, posee la información del factor de *overlap*.

Se han realizado simulaciones de este factor para determinadas condiciones, las cuales permitan establecer los límites de la posición del pico de la señal lidar, y por lo tanto, poder caracterizar al factor de *overlap*. Se observan en las siguientes figuras, simulaciones del factor G para desalineaciones a lo largo de ambos ejes, junto con el factor G óptimo (mostrado en la anterior figura) para una mejor comparación. Se simularon las inclinaciones máximas para cada eje sin perder el $overlap=1$, obtenidas de las figuras 6.4.1. Para mayor claridad, y como se desea caracterizar la posición del pico de las mismas, se muestra en las figuras 6.4.5 (a) y (b) un *zoom* del factor en dicha zona.



(a) Simulación del factor G , con diferentes ángulos de inclinación sobre el eje Este-Oeste. Se muestra, además de la inclinación óptima, los casos de ejes paralelos (azul, 0 mrad) y para $+0,04 \text{ mrad}$, alejando el eje del telescopio del láser (rojo).



(b) Simulación del factor G , con diferentes ángulos de inclinación sobre el eje Norte-Sur. Se muestra, además de la inclinación óptima, de $\pm 0,1 \text{ mrad}$ (rojo y azul), las cuales, son iguales por el carácter simétrico de este barrido con respecto al láser.

Figura 6.4.5: Factor G para diferentes ángulos de inclinación, correspondientes a los máximos para $overlap=1$. Se muestra en cada caso, la inclinación óptima en color negro: $-0,125 \text{ mrad}$ sobre el eje Este-Oeste.

Se observan en estas simulaciones que, a pesar de adoptar desalineaciones mínimas, las cuales no cambian el valor del $overlap=1$ en el largo alcance, si se puede percibir un cambio en el pico de la señal, del orden de los 100 m (aproximadamente 13 bins), entre la señal óptima (negro) y las ligeramente desalineadas (azul y rojo). Esto permite definir una

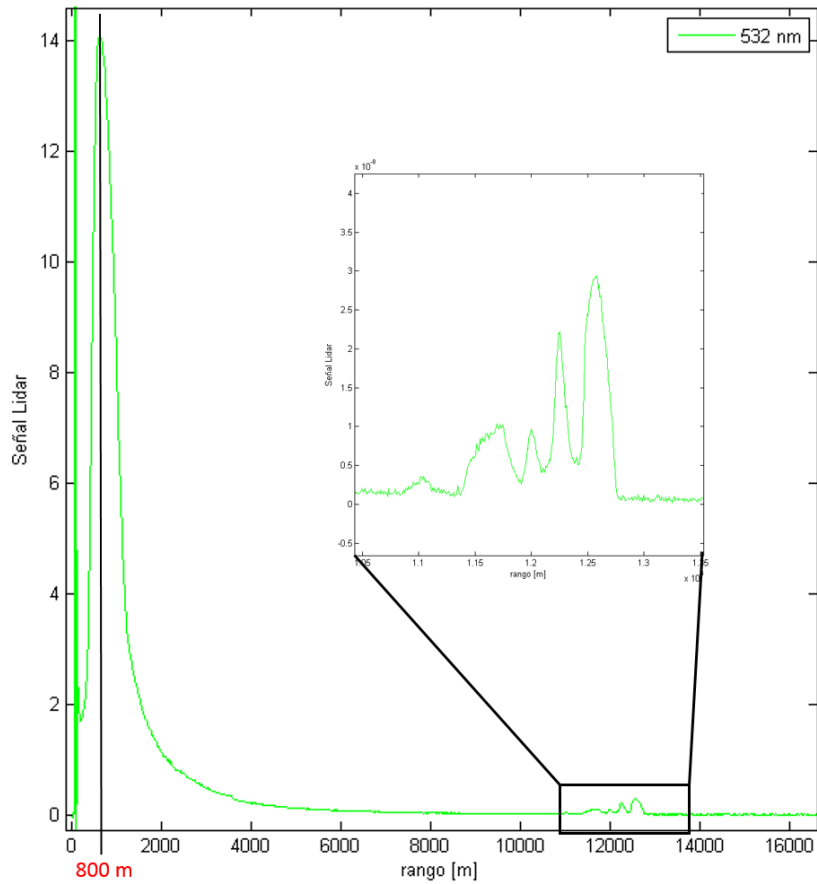


Figura 6.4.6: Señal lidar de 532 nm , adquirida el 24/06/2015 con 1 solo telescopio. Se observa un cirrus entre los 11 y 13 km , y la posición del pico de la señal lidar dentro de los márgenes esperados.

zona donde debe ubicarse el pico de la señal lidar durante el proceso de auto-alineación. Esto aporta un punto más de verificación en la búsqueda por el *overlap* óptimo.

Por lo tanto, se define para el lidar multiángulo de este trabajo, que asegurando un pico de la señales elásticas en un rango entre los 600 y 1200 m (80 bins de rango), podemos asegurar de poseer una correcta alineación. Una comprobación de esto se demuestra a continuación. En la figura 6.4.6 se observa una medición del día 24/06/2015, para una señal lidar de 532 nm adquirida con 1 solo telescopio:

En esta señal, se puede observar dos características que aseguran la correcta alineación del sistema: la distancia del pico, el cual, se corresponde con las anteriores simulaciones del factor G, y la detección de un cirrus en un rango lejano. Esta última característica permite asegurar que se están captando fotones retrodispersados desde esa distancia, la cual, es síntoma de una correcta alineación.

La señal de la figura 6.4.6 permite también corroborar los resultados de la simulación del *overlap*, ya que tanto la simulación obtenida del factor G (y la posición de su pico) concuerdan muy bien con los resultados reales.

6.4.2. Auto-alineación aplicada a un sistema de múltiples telescopios. Obtención de parámetros para la auto-alineación

En las secciones anteriores, se ha analizado como es afectado el factor de *overlap* en función al ángulo relativo de **cada** telescopio con respecto al láser. En esta sección se analizarán sus efectos para una señal lidar generada con la suma de 6 telescopios, y por lo tanto, 6 factores de *overlap*. Bajo esta situación, se analizará cual es la desalineación mínima que puede sufrir 1 telescopio para que el cambio de señal pueda ser detectado en la práctica por la resolución de la electrónica de adquisición. De esta manera, se estará en condiciones de que el algoritmo pueda tomar decisiones de manera autónoma.

Esta resolución es definida como el doble del valor correspondiente a 1 cuenta del sistema de adquisición. Este valor se obtiene en base al valor máximo de señal a detectar, la cual, está configurada en 500 *mV*, junto con los 12 bits de resolución del sistema, arrojando el valor para una cuenta de 0,125 *mV*. Por lo tanto, el límite de detectabilidad (R_{ADC}) se define al doble de este valor, o sea, 0,250 *mV*.

Se expresa a continuación la ecuación lidar elástica, explicitando el factor de *overlap* de cada telescopio:

$$P_{nTel}^a(r) = K_i \frac{(O_1(r) + O_2(r) + \dots + O_{nTel}(r))}{r^2} Atm(r) \quad (6.4.2)$$

$$Atm(r) = \beta^t(r) e^{-2 \int_0^r \alpha^t(r) dr} \quad (6.4.3)$$

donde el sub-índice *nTel* hace referencia a la cantidad de telescopios del sistema; y el super-índice '*a*' es por '*alineado*', haciendo referencia a que todos los telescopios se encuentran en ese estado. Para escribir esta última ecuación, se tiene la premisa de que el factor atmosférico ($Atm(r)$) es el mismo para cada telescopio. Analizando para el caso de que todos se encuentren alineados correctamente, y definiendo la altura de alineación $r = r_a$, donde $O_x(r_a) = 1$, se puede escribir:

$$P_{nTel}^a(r_a) = K_i \frac{nTel}{r_a^2} Atm(r_a) \quad (6.4.4)$$

Se analizará a continuación la factibilidad de aplicación del procedimiento de optimización planteado para 1 telescopio (sección 6.4.1), y los límites de aplicación para un sistema multi-telescopio como el realizado en este trabajo. Esta condición de aplicabilidad estará basada en la condición de que para cada paso de la auto-alineación, la modificación de la señal lidar pueda ser detectada, cambiando su valor en la altura r_a en 0,250 *mV*. En este estudio, se obtendrá también el valor de r_a óptimo para realizar la alineación.

Planteando la ecuación 6.4.4 bajo la condición de que **1 solo telescopio se encuentra desalineado**, se puede escribir:

$$P_{nTel}^d(r_a) = K_i \frac{[(nTel - 1) + O^d(r_a)]}{r_a^2} Atm(r_a) \quad (6.4.5)$$

donde $P_{nTel}^d(r_a)$ es la señal lidar obtenida con *nTel* telescopios, donde 1 se encuentra desalineado, el cual posee un factor de *overlap* $O^d(r_a)$ a la altura de alineación r_a .

Como se apuntó anteriormente, para que la electrónica de adquisición pueda detectar una diferencia de señal, los valores de estas últimas 2 expresiones (6.4.4 y 6.4.5) deben ser mayor a 0,250 *mV* (R_{ADC}). Planteando esto:

$$P_{nTel}^a(r_a) - P_{nTel}^d(r_a) = R_{ADC} = \frac{K_i Atm(r_a)}{r_a^2} [nTel - nTel + 1 - O^d(r_a)] \quad (6.4.6)$$

$$R_{ADC} = \frac{K_i Atm(r_a)}{r_a^2} [1 - O^d(r_a)] \quad (6.4.7)$$

En esta última ecuación (6.4.7), se observa que contiene la expresión de la señal lidar para 1 sólo telescopio alineado (ecuación 6.4.4 para $nTel=1$). Por lo tanto, para mayor claridad tenemos:

$$R_{ADC} = P_1^a(r_a) [1 - O^d(r_a)] \quad (6.4.8)$$

y despejando $O^d(r_a)$:

$$O^d(r_a) = 1 - \frac{R_{ADC}}{P_1^a(r_a)} \quad (6.4.9)$$

Esta expresión nos dice cual es el del valor que debe adoptar el factor de *overlap* desalineado a la altura r_a ($O^d(r_a)$) para que el cambio de la señal lidar con respecto al sistema alineado sea detectable por el sistema de adquisición.

Una conclusión importante que se obtiene de la ecuación 6.4.9 es la independencia de la cantidad de telescopios que posee el sistema, ya que solo importa la señal obtenida con 1 telescopio en condición de óptima alineación ($P_1^a(r_a)$) y de la resolución de detectabilidad del sistema (R_{ADC}). Además, esta expresión permite la elección de la altura óptima utilizada para la auto-alineación r_a .

Para poder graficar $O^d(r_a)$, es necesario simular $P_1^a(r)$, para la cual, se utilizaron los mismos parámetros atmosféricos del capítulo 3. Cabe recordar, que ésta simulación es realizada bajo condiciones aerosólicas extremas ($AOD=0,2 @ 355 \text{ nm}$), como las planteadas en la tabla 3.4.2 del mencionado capítulo. Para una mayor claridad de los efectos de la atenuación aerosólica en $O^d(r_a)$, se muestra también una simulación para un AOD 10 veces menor, o sea, de $0,02 @ 355 \text{ nm}$. La longitud de onda utilizada para el procedimiento de auto-alineación es la de 532 nm . Por lo tanto, con $R_{ADC}=0,250 \text{ mV}$, se grafica $O^d(r_a)$ en la figura 6.4.7.

De este último gráfico se obtienen conclusiones muy importantes en el diseño de los parámetros de la auto-alineación. Observando la peor condición (línea verde, $AOD=0,2 @ 355 \text{ nm}$), se puede decir:

- El límite máximo de la altura de alineación es cuando $P_1^a(r_a) = R_{ADC}$. Para los valores adoptados, se observa que este valor es de aproximadamente 8 km . Esto significa que si se desea alinear a esta altura, para que la electrónica de adquisición detecte algún cambio en la señal, será necesaria una desalineación completa del telescopio ($O^d(8 \text{ km}) = 0$). Como se observa, para valores de AOD menores (y más esperables), el valor de $O^d(r_a)$ aumenta, haciendo que su valor deba ser de aproximadamente $0,2$ para poder ser detectado.
- A medida que se baja la altura utilizada para la alineación (r_a menores), se necesitará menor cambio de *overlap* para poder ser detectado, y por lo tanto, menor desalineación en cada paso del proceso. Esto es así debido a que $O^d(r_a)$ se aplica a una señal de mayor voltaje, y por lo tanto, se logra una diferencia de R_{ADC} más

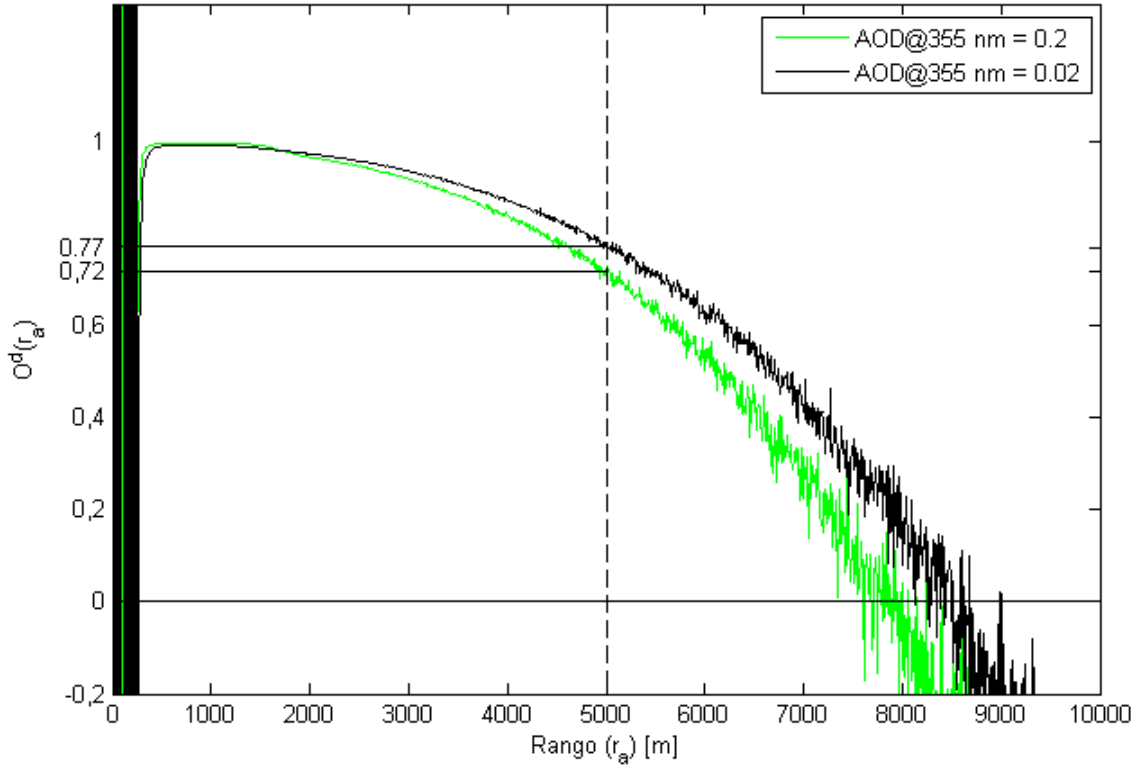


Figura 6.4.7: Valor del factor de *overlap* desalineado de 1 telescopio para poder ser detectado por la electrónica de adquisición. Este cálculo es realizado para la señal de 532 nm, la cual, es la utilizada para la auto-alineación.

rápido. Sin embargo, utilizar zonas bajas como rango de alineación trae algunas desventajas:

1. El valor de r_a no puede ser menor a 2,8 km, ya que es la menor altura a la cual el *overlap* es igual a 1 en su alineación óptima (ver figura 6.4.2). Esto restringe el valor de r_a a utilizar entre $2,8 \text{ km} < r_a < 8 \text{ km}$.
2. El rango definido en el punto 1, deja la chance de caer en una zona con pluma de aerosoles o nubes. Estas pueden cambiar sus parámetros durante el proceso de auto-alineación, modificando el valor de la señal lidar a la altura r_a , produciendo errores en el procedimiento. Por lo tanto, deberá asegurarse al momento de ejecutar este procedimiento de auto-alineación, de realizarse sobre una zona molecular pura.
3. El ángulo óptimo obtenido en el proceso de auto-alineación utilizando zonas bajas, puede no ser el correcto, quedando el telescopio inclinado por demás, y logrando que el *overlap* sea menor que 1 a zonas más altas de la atmósfera.

El punto número 3 de la lista anterior será solucionado corroborando la posición del pico de la señal lidar, como se estudio en la Sub-sección 6.4.1.3.

Por lo tanto, se concluye que ante la imposibilidad de realizar una auto-alineación en rangos lejano ($\geq 10 \text{ km}$), se define $r_a = 5 \text{ km}$. Esta altura es un buen punto intermedio, donde se obtienen altos valores de señal, buena relación S/N, y se necesitan poca desali-

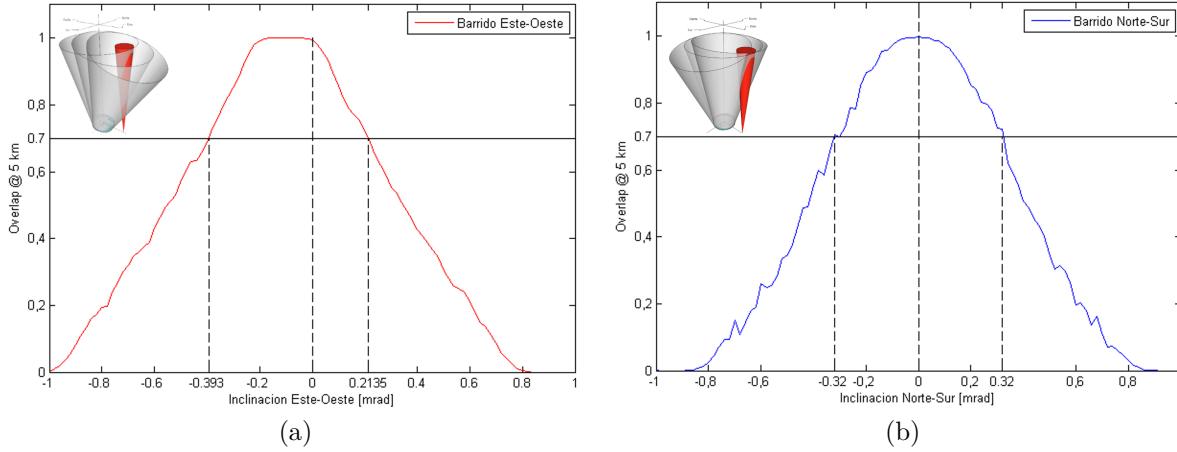


Figura 6.4.8: Simulación del factor de *overlap* a 10 km. La forma irregular de las figuras es debido al método de simulación empleado, el cual, está basado en Monte Carlo A.

neación en cada paso del proceso de auto-alineación para poder detectar el cambio en la señal lidar.

Para poder obtener que ángulo del telescopio que corresponde a un *overlap* de 0,7 o menor, se procedió a su simulación. Para esto, se simuló el factor de *overlap* a la altura de alineación $r_a = 5$ km, de la misma manera que en las figuras 6.4.1. Los resultados se muestran a continuación:

De estas últimas figuras se pueden extraer la desalineación mínima con respecto a su posición óptima para cada eje, las cuales permiten modificar la señal lo suficiente como para poder ser detectadas. Se observan en las últimas dos figuras la marca de $O^d(r_a) = 0,7$, de las cuales se obtienen las siguientes desalineaciones:

■ Eje Este-Oeste:

- +0,21 mrad
- -0,39 mrad

■ Eje Norte-Sur:

- +0,32 mrad
- -0,32 mrad

Y finalmente, para conocer la cantidad de pasos que debe dar el motor para cada posición del proceso de auto-alineación, se hace uso de las resoluciones para cada eje (cuadro 4.2.2 del capítulo 4). Se muestra en el cuadro 6.4.2 la resolución junto con la cantidad de pasos que se deben tomar:

Accionador	Resolución auto-alineación	Cantidad de pasos del motor
A (Este-Oeste)	0,0227 mrad/paso	17
B (Norte-Sur)	0,01265 mrad/paso	25

Cuadro 6.4.2: Resoluciones de cada accionador junto con la cantidad de pasos de cada motor para cada etapa del proceso de auto-alineación.

Esta información es almacenada en el archivo **AlignmentParameters.conf**, la cual, es leída por el proceso **lidarTask**, encargado del procedimiento de auto-alineación. Un ejemplo de este archivo con los parámetros obtenidos se observa en el algoritmo 6.1.

Algoritmo 6.1 Archivo de configuración **AlignmentParameters.conf**, el cual contiene los parámetros de los motores en el proceso de auto-alineación.

```
1 [Motor A]
2 StepA=17
3 HalfSpamA=3
4 [Motor B]
5 StepB=25
6 HalfSpamB=3
```

En este archivo se especifican la cantidad de pasos a dar entre cada adquisición (**StepA** y **StepB**), y la cantidad de adquisiciones para medio barrido (**HalfSpamA** y **HalfSpamB**). Esto significa que, desde la posición de partida del proceso de auto-alineación, se obtendrán **HalfSpamX** adquisiciones hacia cada lado, resultando un barrido total de $(2*\text{HalfSpamX}+1)$ mediciones.

6.5. Conclusiones

Se documentó en este capítulo la implementación de la capacidad de auto-alineación del sistema lidar multi-telescopio. Se ha realizado también un estudio minucioso del *overlap* del sistema, y las modificaciones que le impone a la señal lidar adquirida. Esto fue posible gracias al *software* de simulación también realizado para en este trabajo. Esto ha permitido calcular los parámetros óptimos a utilizar en el procedimiento de auto-alineación. Todo este sistema posee una gran autonomía, en el que trabajan cooperativamente 2 procesos en la PC de control, junto con el *firmware* del microcontrolador, ubicado en el lidar.

Este desarrollo es un gran paso en la operación de los lidars desatendidos, ya sea para el control remoto, como también en los casos donde el operador no es un experto de la técnica lidar.

Capítulo 7

Reconocimiento automático de zonas moleculares y filtrado de las señales detectadas

7.1. Introducción

Se describe en este capítulo el método desarrollado para el filtrado de las señales lidar adquiridas, como también la detección automática de los rangos moleculares. Para esto, se hace uso de las señales elásticas medidas y los perfiles moleculares correspondientes ($\alpha^m(r)$ y $\beta^m(r)$) obtenidos por medio de radiosondeos. La automatización de este procedimiento representa un gran avance en el procesamiento e inversión de las señales, ya que es una tarea que comúnmente se realiza de manera manual, principalmente, la elección de la altura de referencia molecular en el método de inversión elástico (ver capítulo 8). Cuando así sucede, es necesario tener en cuenta que la altura de referencia seleccionada lo sea para todo el *set* de datos. De no ser así, se corre el riesgo que para algún perfil de la medición, una nube o pluma de aerosoles a la altura de referencia seleccionada rompa con la condición de tropósfera libre. Esto se ve maximizado por el hecho de tratar con señales multiángulo, donde la condición de zona molecular pura para la altura de referencia seleccionada se debe cumplir en todas las posiciones acimutales/cenitales adoptadas durante el escaneo. Por lo tanto, un algoritmo de detección automático de zonas moleculares, mejora la calidad de la inversión y reduce en el error sistemático. Este algoritmo permite además el filtrado del ruido aleatorio en las zonas moleculares, el cual, traerá grandes ventajas al momento de la inversión, principalmente para las señales Raman. De manera resumida, el método que se describe en este capítulo permitirá:

- Detectar automáticamente la ubicación espacial de las zonas moleculares puras en la señal lidar adquiridas, como también las plumas de partículas y nubes.
- Encontrar la altura de referencia (molecular) óptima, reduciendo el error sistemático asociada a la elección de la misma. Esta altura de referencia es utilizada en el método de inversión elástico (capítulo 8 sección 8.2.1).
- Filtrar el ruido aleatorio en las zonas moleculares de las señales lidar elásticas y Raman.

Para poder lograr esto, es necesario que la señal lidar elástica a analizar cumpla con la condición **de poseer alguna zona molecular** dentro del rango de análisis.

El filtrado del ruido aleatorio es de gran utilidad para el procesamiento posterior de las señales, principalmente debido al poco tiempo de promediación utilizado. Esto traerá considerables ventajas en la inversión de la señal Raman, donde la eliminación de este tipo de ruido es de gran importancia para su tratamiento numérico.

7.2. Detección automática de zonas moleculares y filtrado. Concepto del método

Este algoritmo se basa en el reconocimiento de las zonas moleculares por medio de la comparación entre la señal lidar elástica adquirida con una **señal lidar molecular pura**, formada por $\alpha^m(r)$ y $\beta^m(r)$, la cual es considerada para este estudio **sin ruido aleatorio**. El origen de este análisis está basado en el proceso denominado *Rayleigh-fit*, desarrollado en [121] y [122] en el marco de la red europea de lidares Earlinet [60]. El concepto de esto está basado en la aproximación de la señal lidar adquirida por medio de una señal lidar molecular pura, por medio de la reducción del error cuadrático medio entre ambas.

Se detallan a continuación las expresiones de las señales lidar elásticas, donde para mayor claridad se omite el factor de *overlap* ($O(r)$). Se escribe la **señal lidar adquirida** como:

$$P^{el}(r) = K_i \frac{[\beta^m(r) + \beta^p(r)]}{r^2} e^{-2 \int_0^r [\alpha^m(r) + \alpha^p(r)] dr} + P_{bkg} + \delta P(r) \quad (7.2.1)$$

donde se explicitan los términos de ruido, correspondientes a la componente de fondo (P_{bkg}) y el ruido aleatorio producto de la medición ($\delta P(r)$). Este ruido fue simulado en el capítulo 3, sección 3.4.3, en el diseño conceptual del lidar. Para poder obtener la expresión corregida en rango, se debe substrar P_{bkg} , el cual se obtiene de la adquisición sin disparos del láser. Por lo tanto, eliminando P_{bkg} y multiplicando por r^2 en la expresión 7.2.1 se obtiene la señal lidar elástica corregida en rango:

$$P^{el}(r)r^2 = S^{el}(r) = K_i [\beta^m(r) + \beta^p(r)] e^{-2 \int_0^r [\alpha^m(r) + \alpha^p(r)] dr} + \delta P(r)r^2 \quad (7.2.2)$$

Por otro lado, la señal **lidar molecular pura** se define como:

$$P^m(r)r^2 = S^m(r) = \beta^m(r) e^{-2 \int_0^r \alpha^m(r) dr} \quad (7.2.3)$$

formada con $\alpha^m(r)$ y $\beta^m(r)$, calculados por medio de los datos de radiosondeo local. Esta señal lidar molecular será considerada en este trabajo como libre de ruido, siendo la base del método de filtrado.

Analizando la ecuación 7.2.2 para distancias moleculares puras ($r = r_m$) se cumple:

$$\begin{cases} \alpha^p(r_m) &= 0 \\ \beta^p(r_m) &= 0 \end{cases}$$

y aplicando estas condiciones a la ecuación 7.2.2 se obtiene:

$$S^{el}(r_m) = [K_i \cdot e^{-2 \int_0^{r_m} \alpha^p(r) dr}] \beta^m(r_m) e^{-2 \int_0^{r_m} \alpha^m(r) dr} + \delta P(r_m)r_m^2 \quad (7.2.4)$$

en donde queda en evidencia la existencia de un factor de proporcionalidad entre la ecuación 7.2.4 y 7.2.3, formado por $[K_i e^{-2 \int_0^{r_m} \alpha^p(r) dr}]$, sumado al término del ruido aleatorio corregido en rango $\delta P(r) \cdot r^2$. Cabe aclarar que, la integral en el exponente de e correspondiente a la transmisión aerosólica es constante en zona molecular, ya que allí $\alpha^p(r_m)=0$, y sólo queda el aporte de la integral en la zona aerosólica previa. Esta constante no se conoce *a-priori*, ya que ni la constante de instrumental K_i ni $\alpha^p(r)$ son datos. Sin embargo, se puede aproximar el resultado de $[K_i e^{-2 \int_0^{r_m} \alpha^p(r) dr}]$ por medio de la minimización del error RMS en un rango molecular Δr_m entre $S^m(r)$ y $S^{el}(r)$. De esta manera, la señal lidar elástica medida puede ser reemplazada por la señal lidar molecular pura, afectada por una constante, logrando además un gran filtrado del ruido aleatorio formado por el término $\delta P(r)r^2$. Esto es:

$$S^{el}(r_m) \implies a \cdot S^m(r_m)$$

En la figura 7.2.1 se muestra la aplicación de este algoritmo a una señal lidar elástica medida de 532 nm ($S^{el}(r)$, línea negra), junto con un perfil lidar molecular puro ($a \cdot S^m(r)$, línea roja) que minimiza el error RMS entre ambas en la zona molecular.

Para este ejemplo, no existen plumas de partículas ni nubes por encima de la capa límite atmosférica. Este concepto es el aplicado para la detección de zonas moleculares,

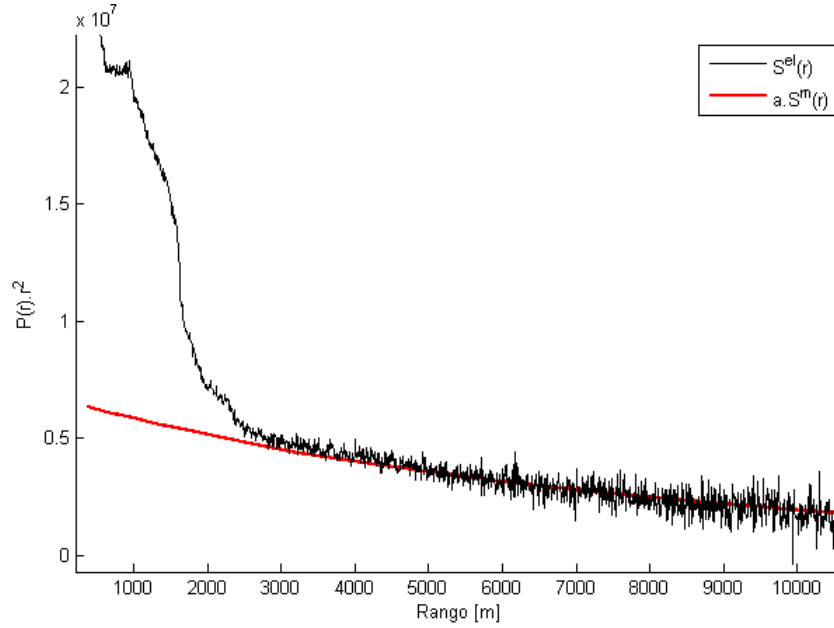


Figura 7.2.1: Aproximación de un perfil molecular puro de 532 nm (línea roja) en la zona molecular de una señal adquirida a la misma longitud de onda.

como también, para el filtrado del ruido aleatorio en estas zonas. Esto es llevado a cabo mediante el reemplazo de la señal $a.S^m(r_m)$ en $S^{el}(r)$, eliminando el ruido aleatorio de la señal medida (término $\delta P(r).r^2$ de la ecuación 7.2.4). Se describe en las siguientes secciones el método de detección de las zonas moleculares y el proceso de filtrado basado en este concepto.

7.2.1. Procedimiento de detección automática de zonas moleculares y filtrado

Se describe en esta sección el método para la detección automática de zonas moleculares en la señal lidar elástica por medio de la cuantificación **de la señal lidar medida en función de la señal lidar molecular pura**. La publicación de este trabajo está en proceso, y el resumen del mismo ha sido enviado al IX WLMLA (9° Workshop on Lidar Measurement un Latin America) [123].

La detección de las zonas moleculares se basa en el mismo concepto planteado en la sub-sección anterior: que la señal lidar medida pueda ser aproximada por una señal lidar molecular pura por medio de una regresión lineal simple (*Rayleigh-fit* según [121] y [122]). De esta manera, un rango de la señal lidar es definido como molecular **cuando el error RMS con respecto a la señal lidar molecular pura es mínimo, en comparación con el resto de la señal**. Basado en este concepto, para realizar la detección de las mismas, se desarrolló para esta tesis un algoritmo que permite su detección automática. Para esto, se define una ventana de exploración Δr , que se utilizará para barrer la señal lidar medida en busca de las zonas moleculares. El procedimiento de dicho barrido se describe es el siguiente:

- Se barre con la ventana de exploración (Δr) a lo largo de toda la señal lidar **corregida en rango ($S(r)$)**, realizando para cada posición el cálculo de la constante de proporcionalidad que minimiza el error RMS entre $S^{el}(r)$ y $S^m(r)$. Esta constante surge de plantear una regresión lineal simple entre ambas señales:

$$\frac{d}{da} \sum_r^{r+\Delta r} \left[(S^{el}(r) - a * S^m(r))^2 \right] = 0 \quad (7.2.5)$$

obteniendo la constante de proporcionalidad a como:

$$a(r, (r + \Delta r)) = \frac{\sum_r^{r+\Delta r} [S^{el}(r) \cdot S^m(r)]}{\sum_r^{r+\Delta r} [(S^m(r))^2]} \quad (7.2.6)$$

- Se calcula el error cuadrático medio en el mismo entorno $[r; (r + \Delta r)]$:

$$ErrRMS(r, (r + \Delta r)) = \frac{\sum_r^{r+\Delta r} \left[(S^{el}(r) - a * S^m(r))^2 \right]}{\Delta r} \quad (7.2.7)$$

- Finalizado el barrido en toda la señal, se busca la posición del Δr **que obtuvo el menor error RMS**. De esta manera queda definido el rango $([r_m; (r_m + \Delta r)])$ como zona molecular.
- Para el siguiente barrido, se posiciona a la ventana Δr **a continuación de la zona molecular recientemente detectada**, y se repite el procedimiento marcando las posibles nuevas zonas moleculares. Este proceso se detiene cuando el posicionamiento de la ventana $(r_m + \Delta r)$ llega al final de la señal lidar o a un rango límite impuesto.

Un ejemplo de este procedimiento se observa en la figura 7.2.2. Allí se muestra una señal lidar de 532 nm medida en la vertical, en la que se le superponen la aproximación de la señal molecular pura y su error RMS para 3 diferentes zonas: 1 aerosólica y dos moleculares. Se utilizó una ventana de barrido de 1500 m, la cual es la recomendada para casos en donde no existan plumas de aerosoles o nubes por encima de la capa límite atmosférica.

Se observa al lado de cada *fiteo*, el error cuadrático medio obtenido por medio de la ecuación 7.2.7, en la que se observa que la zona que obtiene **menor error cuadrático medio corresponde al rango molecular más bajo**.

Como se observa, este método trabaja con las señales lidar corregidas en rango para que el término del error aleatorio $\delta P(r)$ se vea afectado por r^2 (ecuación 7.2.4), generando una amplificación del ruido a mayores alturas. El resultado de esto es una mayor predisposición a detectar zonas moleculares bajas, ya que si se compara el error *ErrRMS* de diferentes zonas moleculares, será menor el correspondiente a la ventana ubicada en un rango más cercano al lidar. Por este motivo, una vez detectado una zona molecular, el próximo rango de barrido se realiza comenzando con la ventana de exploración hacia rangos más elevados de la zona molecular detectada en el paso anterior. Finalizado este procedimiento, se realiza una última aproximación lineal de todas las zonas moleculares que quedaron adyacentes, para generar un único perfil molecular en las zonas correspondientes. En el apéndice C se realiza un desarrollo matemático en donde se justifican las diferentes características que surgen de este análisis.

Para ejemplificar este procedimiento de *fiteo*, cuantificación y posterior filtrado de la señal, se muestran los resultados con señales sintéticas. El modelo atmosférico utilizado es el mismo del capítulo 3, con el agregado de una pluma de aerosoles a los 6 km. Se muestra

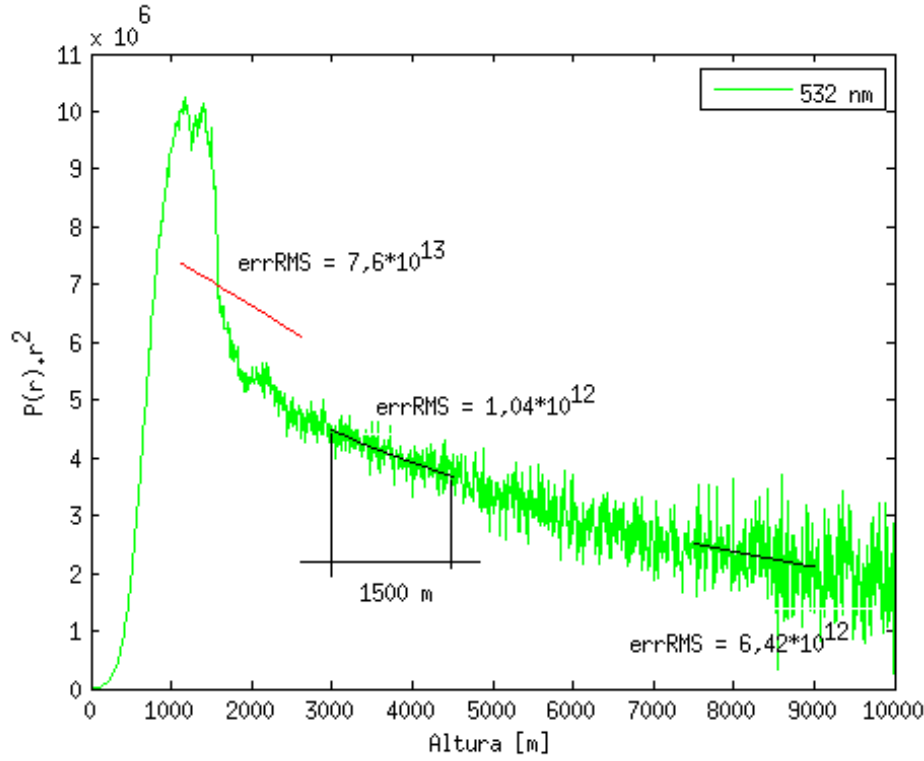


Figura 7.2.2: Ejemplo del procedimiento de detección de zonas moleculares en una señal lidar elástica.

en la figura 7.2.3 la señal lidar elástica simulada para 532 nm ($S^{el}(r)$), junto con el *fiteo* de la señal lidar molecular ($a.S^m(r)$) antes y después de la pluma de aerosoles.

En la figura 7.2.3 se observan las señales lidar elásticas moleculares (líneas azul y roja) adaptadas en la señal lidar adquirida (línea negra). Se puede notar que, cuando la ventana de exploración Δr pase por una zona aerosólica o nube, el error RMS será mayor que en otras zonas de la señal, evitando que sean marcadas como moleculares. De esta manera, por medio del error RMS, **se cuantifica la señal lidar elástica en términos de la señal molecular pura en el entorno $[r; (r + \Delta r)]$.**

Este proceso de detección de zonas moleculares es realizado con la señal lidar elástica de 532 nm, la cual posee una buena respuesta a los aerosoles/nubes, permitiendo una fácil detección de las mismas. Para las señales lidar Raman, y debido a que los rangos moleculares detectados son los mismos que para las señales elásticas, se evita el proceso de barrido y calculo del error RMS. Por lo tanto, se procede a adaptar la señal molecular pura en la señal medida en los mismos rangos detectados con la señal elástica. Es en este tipo de señales donde mejor se aprovecha la supresión del ruido aleatorio, obteniendo grandes ventajas en su inversión. Un ejemplo de esto, se observa en la figura 7.2.4, donde la señal lidar Raman simulada correspondiente al ejemplo de la figura 7.2.3 es aproximada por medio de las señales moleculares antes y después de la pluma de aerosol.

Finalmente, el filtrado se realiza por medio del reemplazo de las señales lidar moleculares ajustadas en las señales lidar adquiridas. Como se observa en la figura 7.2.4, los niveles de supresión de ruido aleatorio en este tipo de señales es muy grande, y es donde radica el principal uso de este método de filtrado. Las señales resultantes permiten una inversión sin problemas numéricos en la implementación de la ecuación 8.2.14 del capítulo 8.

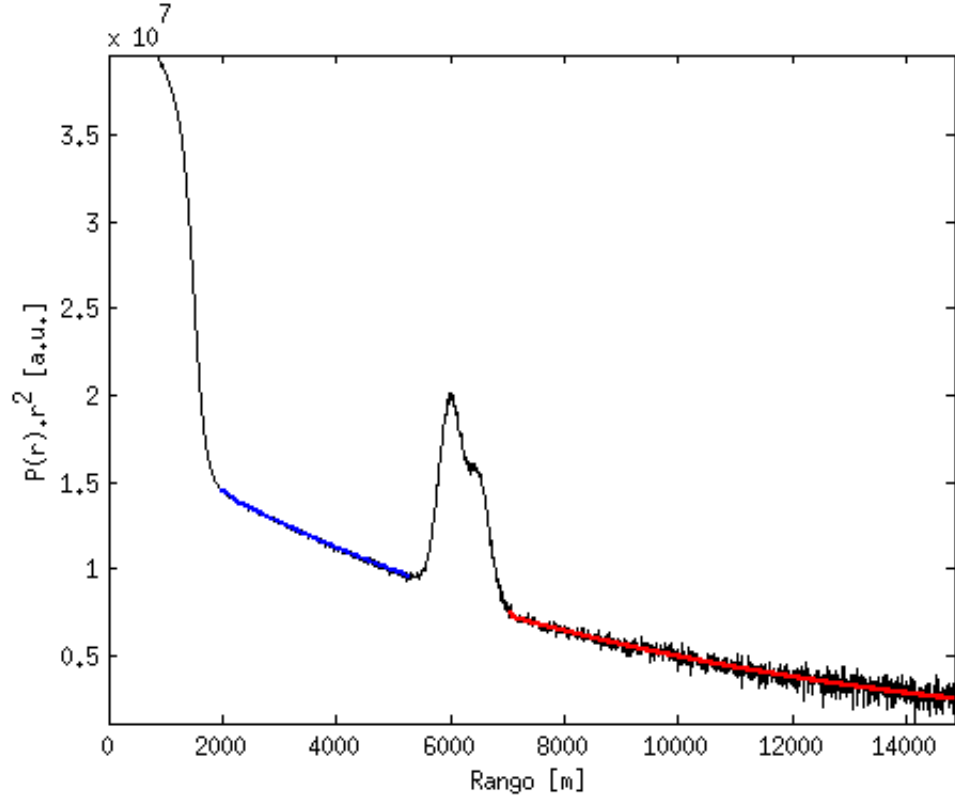


Figura 7.2.3: Simulación de una señal lidar elástica corregida en rango de 532 nm con una pluma de aerosoles a los 6 km . Se observan antes y después de la pluma los perfiles **lidar elásticos moleculares puros** ajustados para la minimización del error RMS.

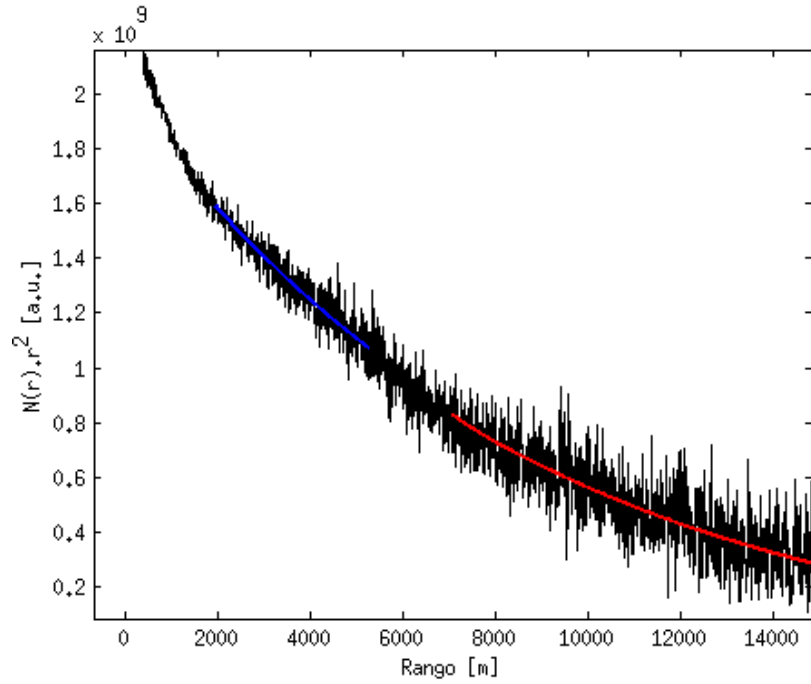


Figura 7.2.4: Simulación de una señal lidar Raman corregida en rango de 607 nm , con una pluma de aerosoles a los 6 km . Se observan antes y después de la pluma los perfiles **lidar Raman moleculares puros** ajustados para la minimización del error RMS.

Una de las ventajas que posee este algoritmo es que necesita de sólo un parámetro de entrada para su funcionamiento: en ancho de la ventana de barrido Δr . Para el correcto funcionamiento, este parámetro debe cumplir con una sola condición: que el ancho Δr sea **menor a la diferencia entre dos zonas aerosólicas**. Esto permitirá la detección de la zona molecular existente entre ellas, y por lo tanto, la pluma de partículas/nubes. Si el Δr no cumple con esta condición, en el proceso de cuantificación se tomará alguna zona aerosólica dentro de la ventana, dando como resultado un alto error RMS. Esto hace que la elección de Δr sea un compromiso, ya que valores grandes de este parámetro permite contar con mayor información en el cálculo del error, pero puede suprimir plumas de aerosoles. De la misma manera, valores chicos de este parámetro reduce la información para el ajuste entre la señal $S^{el}(r)$ y $S^m(r)$. Se recomienda para atmósferas limpias, como en el caso de los sitios donde se instalará este lidar, utilizar valores de Δr de aproximadamente 1500 m (200 bins).

En las figuras 7.2.3 y 7.2.4, los perfiles moleculares antes y después de la pluma fueron afectados por diferentes constantes para la minimización del error. Esto es así ya que los aerosoles imponen una atenuación mayor en la señal, por lo que el perfil molecular posterior (línea roja) a la misma posee un nivel inferior al perfil lidar molecular anterior (línea azul). Para completar el método de filtrado, se necesita de un algoritmo capaz de tratar las zonas aerosólicas, filtrando su ruido aleatorio y realizando una transición suave desde/hacia las zonas moleculares filtradas. Esto se tratará en la siguiente sección.

7.3. Filtrado de las señales lidar en zonas aerosólicas y transición con las zonas moleculares

Se describió en la sección anterior el filtrado del ruido aleatorio en las **zonas moleculares** de la señal lidar adquirida. Esto consta de la detección de dichas zonas y el reemplazo en las mismas por la señal lidar molecular que minimiza el error RMS en las zonas moleculares detectadas. Esto es:

$$S^{el}(\Delta r_m) \implies a.S^m(\Delta r_m)$$

El resultado de este proceso se observó en las figuras 7.2.3 y 7.2.4 para las señales elásticas y Raman respectivamente.

Una vez reemplazados los perfiles moleculares en las zonas correspondientes, se debe realizar el “pegado” de la señal molecular adaptada con las zonas aerosólicas, como también, el filtrado de las mismas. Este trabajo es diferente para las señales elásticas de las Raman, siendo más delicado en estas últimas.

Debido a la intensidad de las señales elásticas, no es necesario un procedimiento de suavizado muy complejo, por lo que para este trabajo, se realiza un suavizado de media móvil en la intersección de estas zonas, como también, en las zonas aerosólicas. El ancho de la ventana de suavizado que se utiliza es de 37,5 m (5 bins), el cual, genera muy buenos resultados en la señal resultante.

En el caso de las señales Raman, el procedimiento es un poco más complejo, el cual implica realizar una transición suave entre las diferentes zonas moleculares con las aerosólicas. Esto es debido a que una señal Raman posee un comportamiento muy diferente ante una pluma de aerosoles, como se observó en la figura 7.2.4. Para mayor claridad, se observa en la figura 7.3.1 una comparación entre una señal elástica y una Raman ante la presencia de nubes.

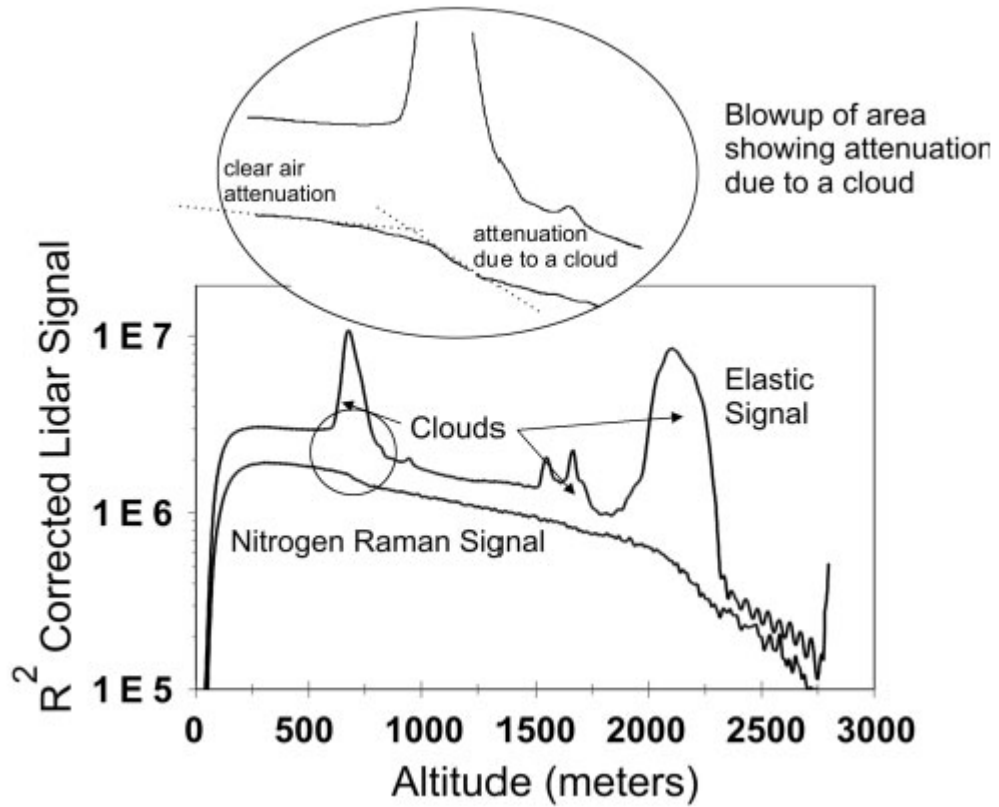


Figura 7.3.1: Ejemplo de comportamiento de señales lidar elásticas y Raman ante la presencia de nubes o plumas de aerosoles. [16]

Se observa en la figura 7.3.1 que mientras las señales elásticas presentan un aumento de la señal ante la presencia de nubes o plumas de aerosoles, la señal Raman presenta una atenuación más marcada a lo largo de la pluma. Luego, a continuación de la misma, sigue un perfil molecular pero con una mayor atenuación.

El filtrado del ruido aleatorio en las plumas aerosólicas se realiza por medio de una recta, la cual, conecta el último punto de la zona molecular anterior y el primero de la zona molecular posterior a la pluma. Luego de este proceso, se realiza un filtrado de media móvil comenzando 10 bins (75 m) antes de la pluma y finalizando 10 bins después. El resultado final de este proceso es difícil de apreciar visualmente (ver figura 7.3.2). De todas maneras, al momento de la inversión, el procesamiento de esta señal permite destacar la pluma en el perfil de $\alpha_p(r)$.

Con respecto al tratamiento de la señal en la capa límite atmosférica, la misma se filtra utilizando una aproximación lineal por piezas. Esto consta de realizar un particionado de la misma, con secciones de 10 bins (75 m). Luego, dentro de cada sección se realiza una aproximación lineal, y finalmente un suavizado de media móvil con una ventana de 10 bins.

Como ejemplo del resultado del proceso de filtrado, se muestra a continuación un set de señales lidar elásticas del día el 22/07/2015, con el resultado de su filtrado. Se eligió ese día en particular ya que las señales manifiestan la presencia de un cirrus entre los 8,5 y 11,5 km.

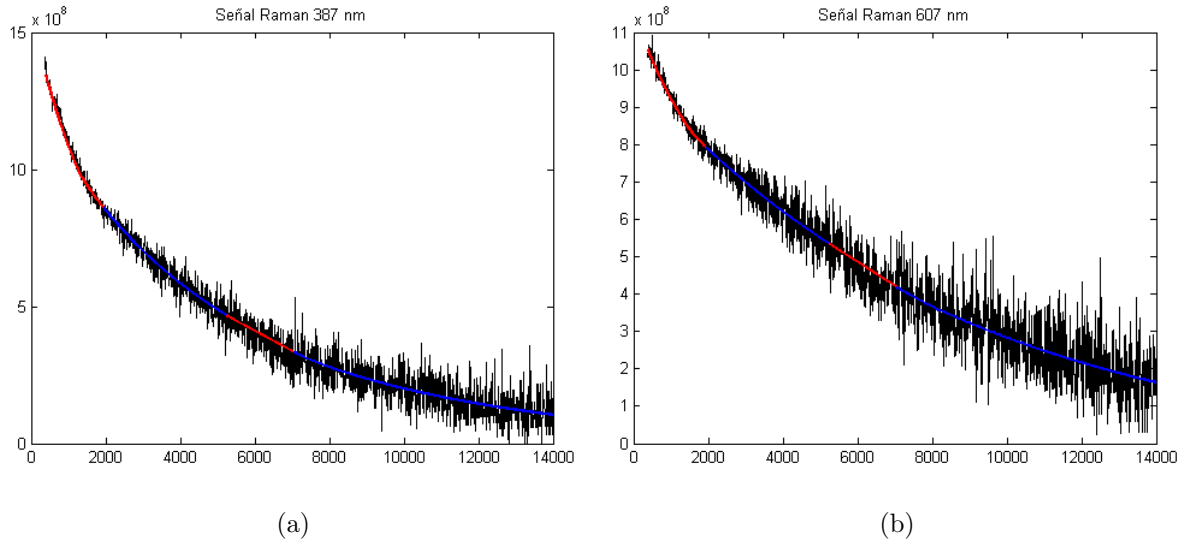


Figura 7.3.2: Señales Raman simulada de 387 (a) y 607 nm (b), junto con el resultado de su filtrado para las zonas moleculares (líneas azul), como para las zonas aerosólicas (líneas rojas)..

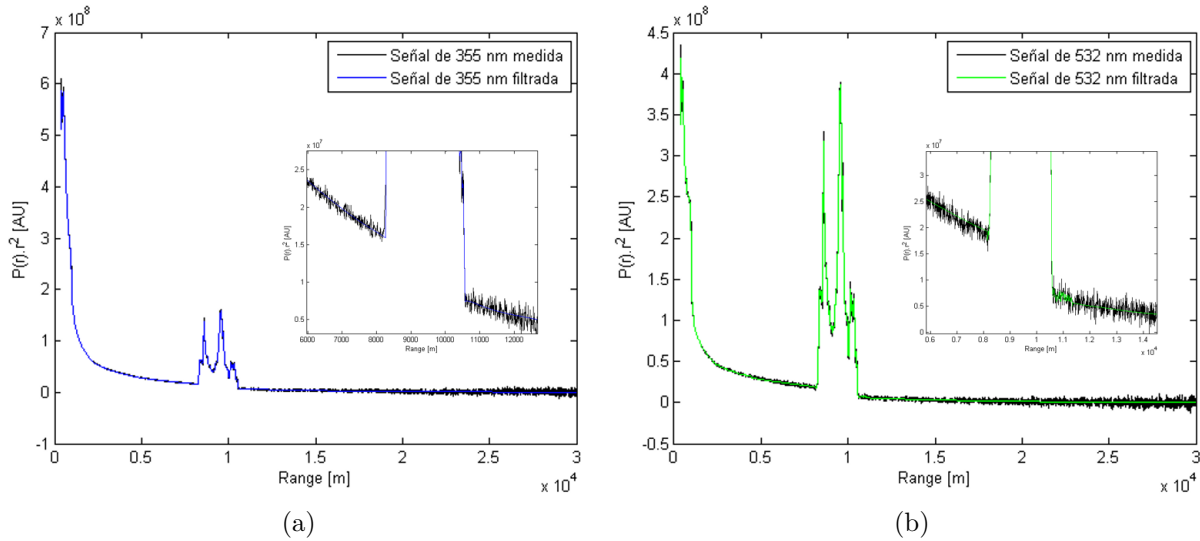


Figura 7.3.3: Señal elástica para (a) 355 nm y (b) 532 nm , adquiridas con 10 s de promediación. En ambos gráficos, en negro se observa la señal adquirida, mientras que en azul (355 nm) y verde (532 nm) el resultado del filtrado.

En estas figuras se observa que en las zonas donde no hay aerosoles, la señal lidar filtrada decae según el perfil lidar molecular. En el *zoom* de la imagen, se aprecia mejor la supresión del ruido, como también la detección de las zonas moleculares antes y después del cirrus. La inversión de estas señales filtradas no representa problemas al momento de la inversión. Este método de filtrado permite reducir considerablemente el error aleatorio de la señal lidar detectada, principalmente en las señales Raman.

7.4. Errores del método de filtrado

La técnica más utilizada para la minimización del ruido aleatorio es utilizar altos tiempos de promediación en la adquisición de los perfiles lidar. En los sistemas lidar convencionales, es común para las señales lidar elásticas tomar promediaciones del orden de algunos minutos, mientras que para las señales Raman, se suelen utilizar decenas de minutos y hasta de una hora. Luego en función de ruido aleatorio resultante, diferentes tipos de promediación espacial son aplicados. Valores típicos utilizados en los lidars de la red europea Earlinet son: promediación temporal de 60 minutos y suavizado espacial por medio de filtros de media móvil de 300 m [124], que permiten reducir el error aleatorio a valores menores del 20 % respecto a la señal medida [17] [125]. Esta promediación puede no ser necesaria en las señales lidar elásticas, principalmente en las zonas bajas de la atmósfera, pero son necesarias para las señales Raman, ya que el ruido aleatorio que presentan es un problema muy grande al momento de la inversión (como se analizará en el capítulo 8).

Como se concluyó en el capítulo 3, este lidar cuenta con seis telescopios para lograr tiempos de promediación bajos (10 s). Esto permite cumplir con la condición de una relación $S/N=1$ a 10 km, pero no exime a las señales Raman de un ruido aleatorio de difícil tratamiento. Esto es debido a la aplicación de la ecuación de inversión Raman para el cálculo del coeficiente de extinción, que implica una operación de la derivada de su logaritmo (capítulo 8, ecuación 8.2.14), generando que los ruidos del tipo aleatorio se maximicen. Esto dará como resultado una inversión con perfiles sin sentido si no se adoptan las medidas de filtrado necesarias. Es por esto que se ha realizado para esta tesis un método de filtrado que acondiciona la señal lidar para un mejor trabajo numérico sobre las mismas.

Se analizan en esta sección los errores que se cometen en el método de filtrado, y como se traducen en el error aleatorio final de la señal lidar filtrada. Estos errores están asociados al cálculo de la constante de proporcionalidad que afecta a la señal lidar molecular pura (ecuación 7.2.6). Considerando que los parámetros atmosféricos no cambian, esta constante será dependiente del error aleatorio de la señal lidar. Para realizar este análisis, se simula un set de señales lidar (elásticas y Raman), para 0° y 45° cenitales. Se utilizó para la simulación un AOD=0,1, sin plumas de aerosoles ni nubes.

Al set de señales generado se le calcula el error aleatorio antes y después del filtrado, para comparar los niveles de supresión de ruido obtenidos. Los errores de la señal filtrada serán menores en las zonas libres de aerosoles, ya que es ahí donde se reemplaza por la señal molecular pura, mientras que en zonas aerosólicas, sólo se aplica un filtro de media móvil.

7.4.1. Cálculo de los errores

Para el cálculo del error en la señal lidar, se emplea un método Monte Carlo, similar al utilizado en la red europea Earlinet [120]. Para esto, se simula un *set* de señales sintéticas con su ruido aleatorio característico, y se filtra cada uno de los perfiles generados, calculando el error relativo para cada set de datos. Este procedimiento es realizado tanto para las señales elásticas como para las Raman. La ventaja de estudiar los errores por medio de simulaciones permite asegurar que las diferentes señales del *set* de datos sólo difieren por su error aleatorio, manteniendo los parámetros atmosféricos constantes.

La caracterización del error aleatorio de la señal lidar se realiza por medio del **error**

relativo para un set de N perfiles, calculado como el cociente entre la desviación estándar (ΔP) y el valor medio ($\overline{P(z)}$) del set de señales para cada altura. Siendo $P_i(z)$ el perfil número i del set simulado, se utiliza:

$$Error\ Relativo = \frac{\Delta P(r)}{\overline{P(r)}} \quad (7.4.1)$$

donde

$$\Delta P(r) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\overline{P(r)} - P_i(r))^2}{N}} \quad (7.4.2)$$

$$\overline{P(r)} = \frac{\sum_{i=1}^N P_i(r)}{N}$$

donde N es la cantidad de perfiles. Para este análisis se realizará la comparación entre el error relativo de las señales simuladas y las filtradas para un $N=30$. Cada uno de los N perfiles simulados están formados por un tiempo de adquisición de 10 s, según los resultados de la simulación del capítulo 3.

7.4.2. Error en el filtrado de las señales elásticas

Se analiza el mismo set señales lidar simuladas en el capítulo 3, que corresponde a una situación atmosférica adversa, con altos valores de AOD en comparación con una atmósfera típica para los Observatorios Auger y CTA.

Se observa en la figura 7.4.1 el set de 10 señales lidar simuladas a 355 nm para 0° y 45° cenitales, y con un tiempo de adquisición de 10 s para cada perfil. Para una mejor apreciación de los resultados, se grafican las señales lidar **corregidas en rango** ($S(r) = P(r) \cdot r^2$), **mientras que el error relativo calculado es para la señal pura $P(r)$** , ya que este es el que se necesita en las expresiones de la propagación del error en la inversión de las señales (ver capítulo 8).

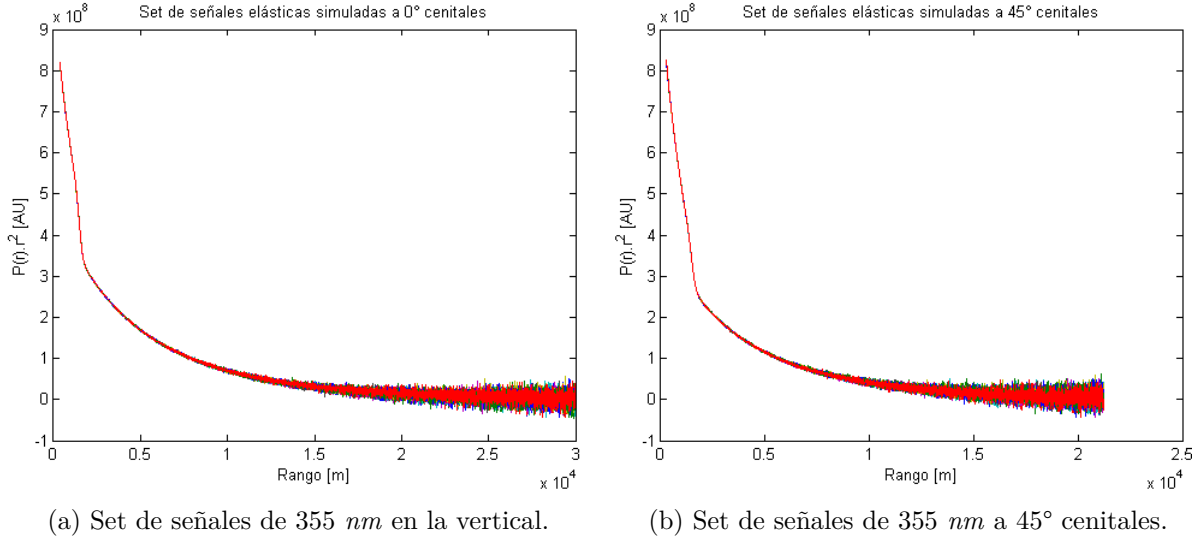


Figura 7.4.1: Set de 10 señales lidar corregidas en rango simuladas, con 10 s de adquisición y un AOD de 0,1. Para una mejor apreciación, se las grafican corregidas en rango ($P_i(r).r^2$).

Se observa en la figura 7.4.2 el error relativo $\Delta P(z)/\overline{P(z)}$ para las señales elásticas de 355 y 532 nm, aplicando la ecuación 7.4.2.

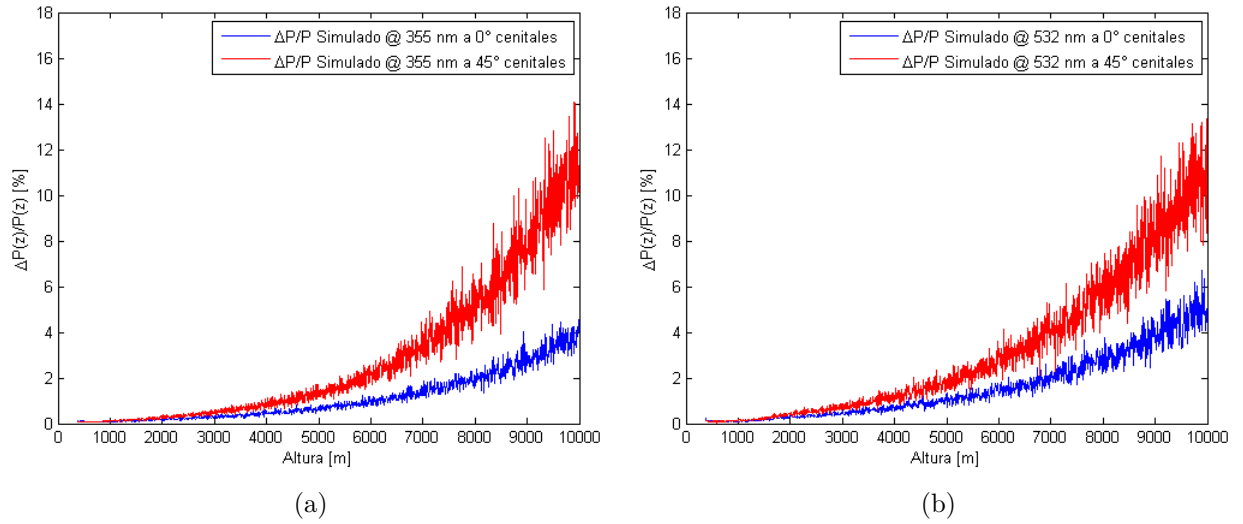


Figura 7.4.2: Error relativo porcentual del set de señales simuladas a 355 y 532 nm, para ángulos cenitales de 0° y 45°.

Se observa que el error aleatorio en la señal a una determinada altura aumenta al aumentar el ángulo cenital. Esto es debido a que la señal en ángulo sufre una mayor atenuación, debido a que la radiación detectada atraviesa una mayor distancia en la atmósfera. A continuación, para cada una de las señales del set de la figura 7.4.1 se aplica el método de filtrado presentado en secciones anteriores. El resultado se muestra en la figura 7.4.3.

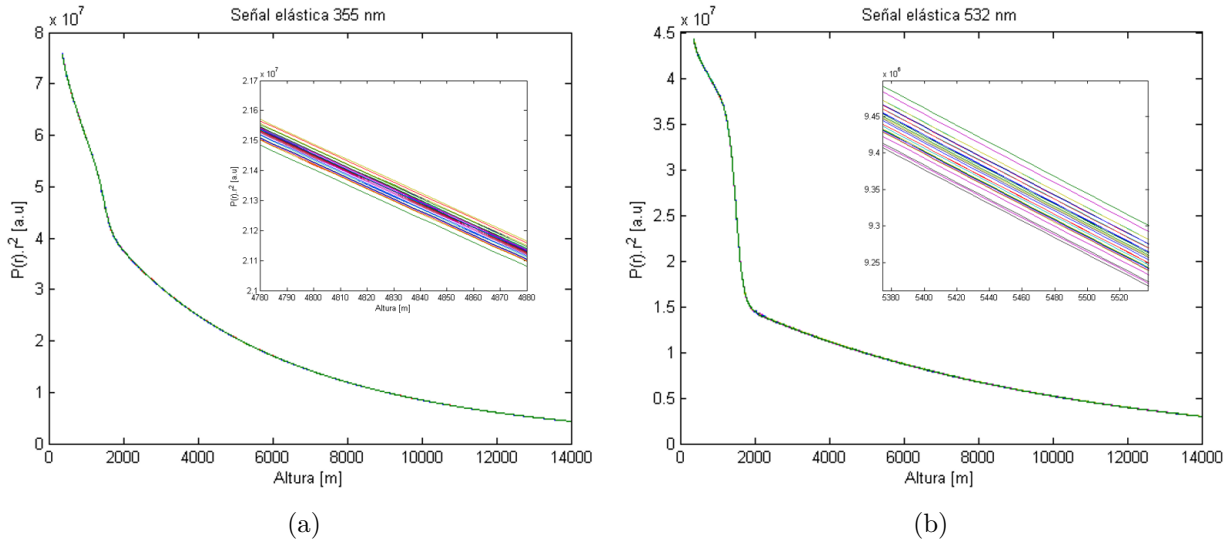


Figura 7.4.3: Set de señales elásticas filtradas, con una ventana de barrido de 300 bins (2250 m). En cada gráfico, se muestra un zoom de una parte de la señal para poder apreciar los diferentes perfiles. Por motivos de simplicidad, se muestran las señales de 355 y 532 nm sólo en la vertical.

En la figura 7.4.3 se observa el gran cambio en el set de señales producto del filtrado. Una de las principales ventajas de este método, es que el ruido aleatorio no se amplifica a medida que aumenta el rango, ya que una vez reemplazada la señal adquirida por la señal molecular pura, el término del ruido aleatorio queda minimizado (término $\delta P(r)r^2$ en la ecuación 7.2.2).

El error relativo del set de señales de la figura 7.4.3, se observa en la figura 7.4.4.

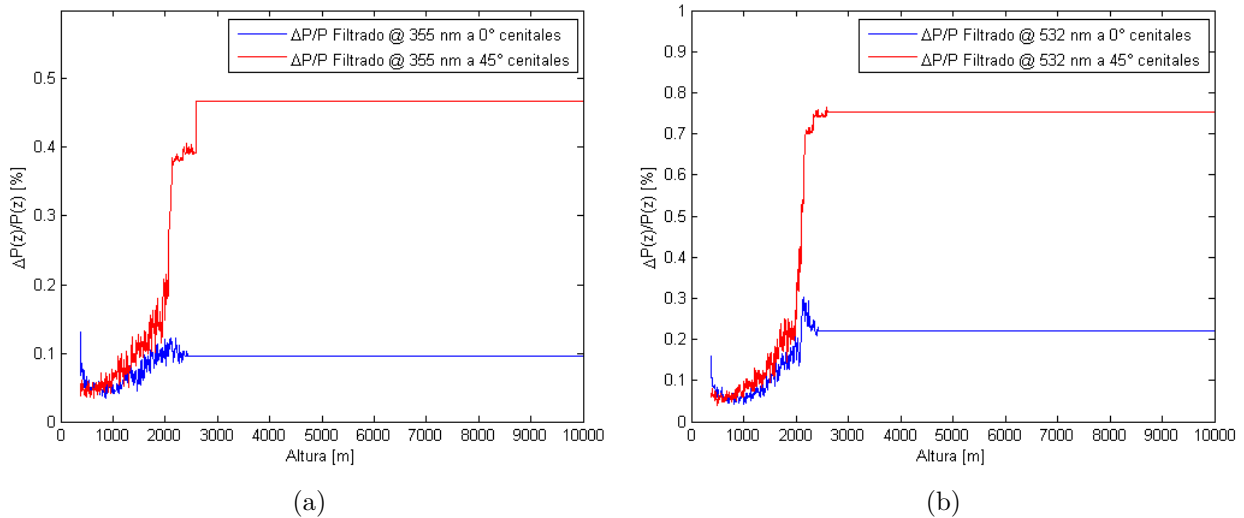


Figura 7.4.4: Error de las señales filtradas para (a) 355 y (b) 532 nm, para 0° y 45°.

Se concluye en base a la comparación de las figuras 7.4.2 y 7.4.4, que con el método de filtrado propuesto se reduce al menos un orden de magnitud el error aleatorio de la señal lidar. Estos resultados serán considerados en el capítulo 8, cuando se contemple la

propagación de estos errores en los resultados de la inversión. Se observa en la figura 7.4.4 una característica particular del filtrado en las zonas moleculares, en donde el error relativo es constante en función de la altura. La explicación matemática a este comportamiento es desarrollada en el apéndice C.

7.4.2.1. Comparación con el método de filtrado de media móvil

A modo de comparación con los métodos de filtrado convencionales, se analizan los resultados de la aplicación de un filtrado de media móvil, utilizando una ventana de ancho de 200 *m*. Según se reporta en [126], este ancho es el mejor para una zona libre de aerosoles, aunque la elección de este parámetro debe ser analizada para cada caso, dificultando la aplicación automática de este método. Además, la forma de obtener los mejores resultados con este método, es definiendo diferentes ventanas de barrido para diferentes partes de la señal lidar, siendo este ancho función no sólo del ruido aleatorio de cada zona, si no también de la existencia o no de plumas aerosólicas, ya que anchos de ventana grandes en comparación con el ancho de la pluma produce un efecto de “erosión” de la misma.

Se muestra en las figuras 7.4.5 los errores relativos de las señales lidar de 355 y 532 *nm*, luego de la aplicación de este tipo de filtrado.

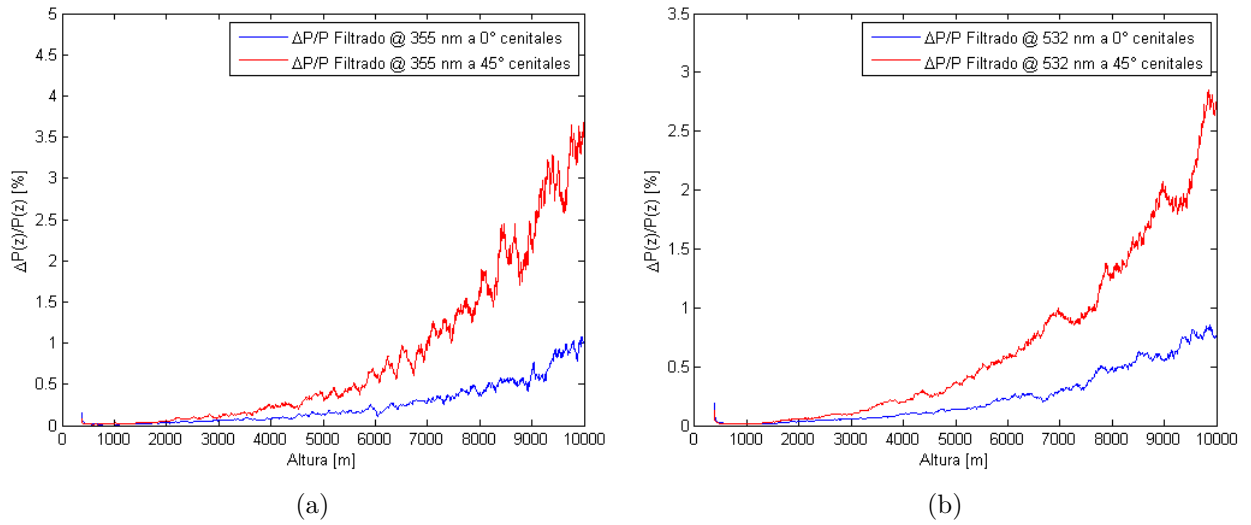


Figura 7.4.5: Errores de la señal elástica luego de un filtrado de media móvil.

Se observa una supresión de ruido en comparación con la figura 7.4.2, pero mayores que los logrados por el método de filtrado planteado en este trabajo. Las aplicaciones del método de media móvil vienen acompañados de un mayor tiempo de adquisición, el cual, no es alternativa para este trabajo.

7.4.3. Error en el filtrado de las señales Raman

En esta sección se aplica el filtrado a un set de señales Raman, simuladas bajo las mismas condiciones de las señales elásticas descritas en la sección anterior. El set de señales Raman utilizado en este análisis se muestra en las figuras 7.4.6.

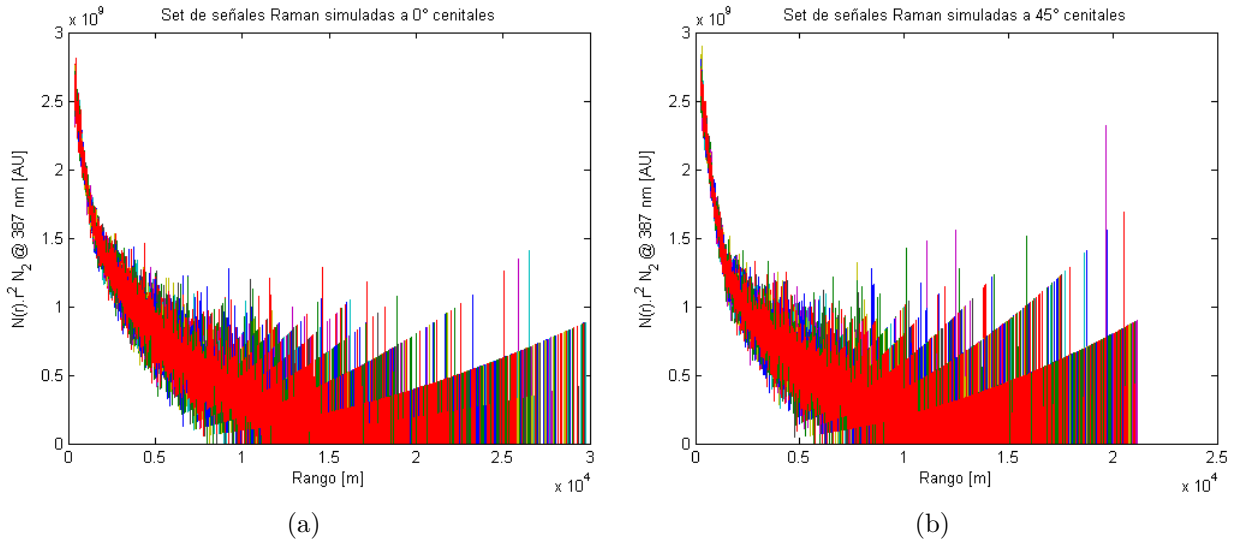


Figura 7.4.6: Set de señales Raman simuladas, utilizando 10 s de adquisición.

El error relativo debido a su ruido aleatorio se calcula con la ecuación 7.4.2, observándose en la figura 7.4.7 que poseen un mayor nivel de error aleatorio en comparación con las señales elásticas (ver figura 7.4.2).

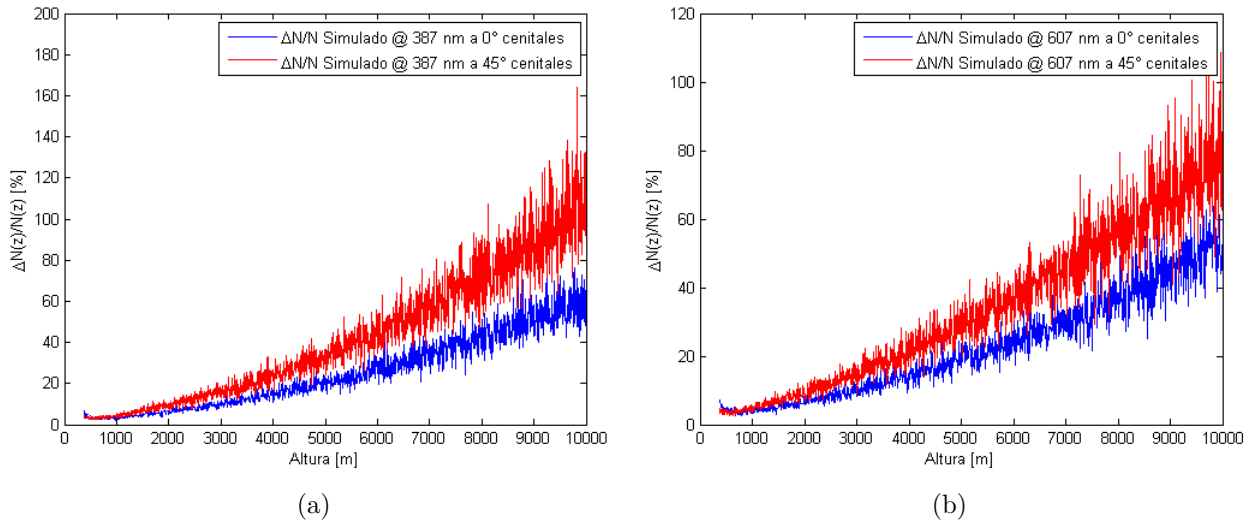


Figura 7.4.7: Error relativo del set de señales Raman simuladas para 10 s de adquisición.

Análogamente al caso elástico, el resultado del filtrado sobre el set de las señales Raman se muestra en la figura 7.4.8.

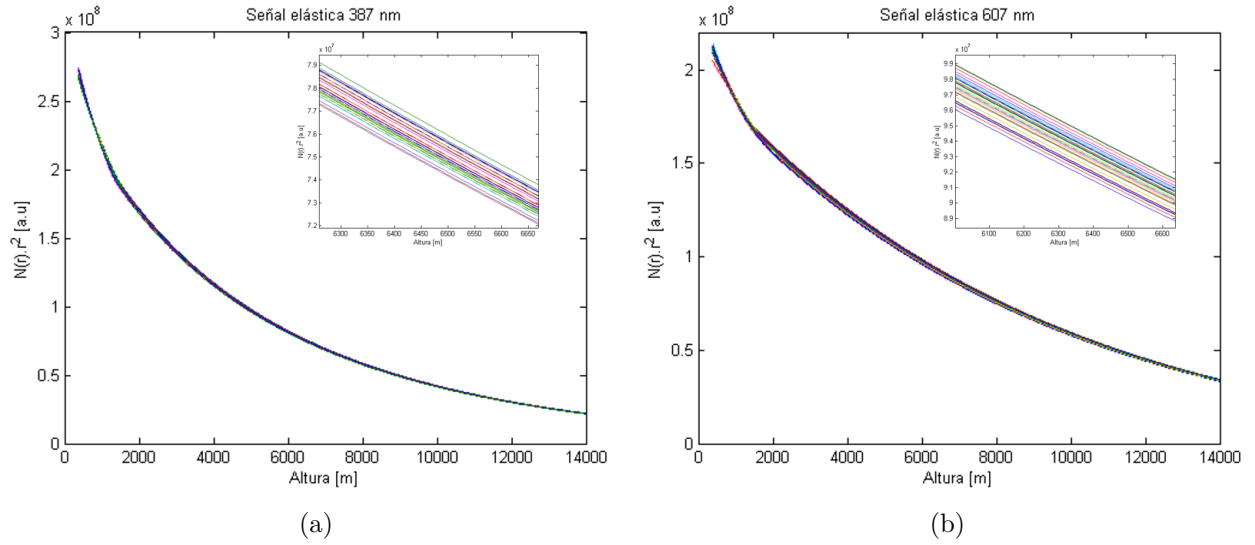


Figura 7.4.8: Set se señales Raman filtradas. Se observa una reducción significativa del ruido en comparación con las señales simuladas.

Al igual que en las señales filtradas (figura 7.4.3), se muestra en las figuras un zoom para poder apreciar la dispersión del set de señales.

El error relativo (ecuación 7.4.2) que poseen estas señales Raman filtradas se muestra en la figura 7.4.9.

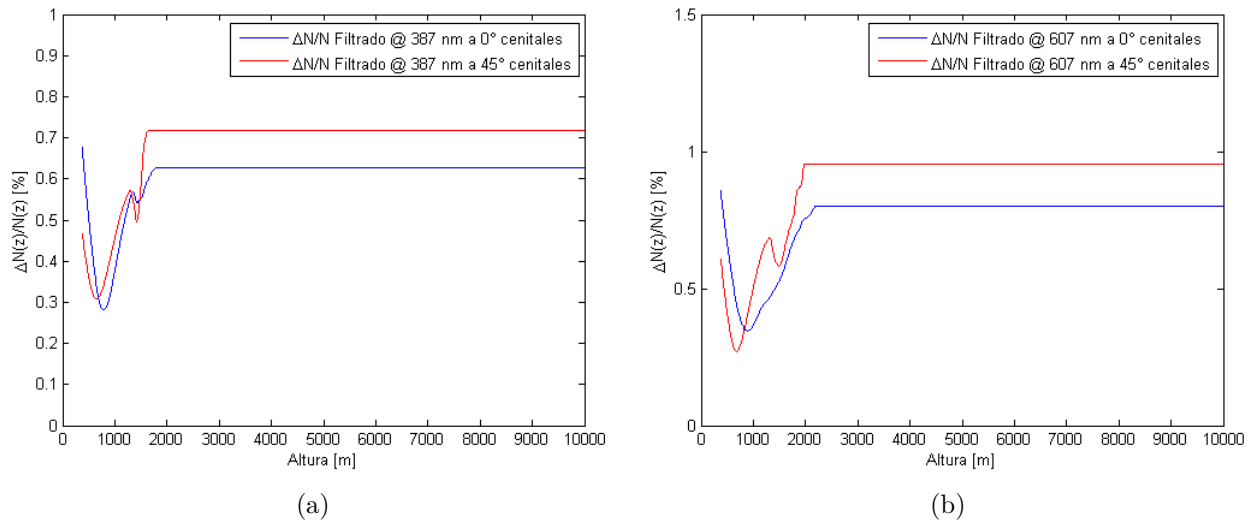


Figura 7.4.9: Error relativo del set de señales Raman filtradas.

Se observan una fuerte supresión de los niveles de ruido para las señales Raman en comparación con las señales sin filtrar (figura 7.4.7). Es aquí donde este método cobra mayor importancia, no sólo por los bajos niveles de ruido aleatorio obtenidos, si no también porque las señales resultantes no divergen ante la derivada en z . Esta es una característica muy importante para la inversión de las señales Raman, como se analizará en el capítulo 8.

7.4.3.1. Comparación con el método de media móvil

De la misma manera que para las señales elásticas, se muestra a continuación los errores relativos en función del rango luego de la aplicación de un filtrado de media móvil para las señales Raman. Se utilizó igual ancho de ventana del caso elástico (200 m).

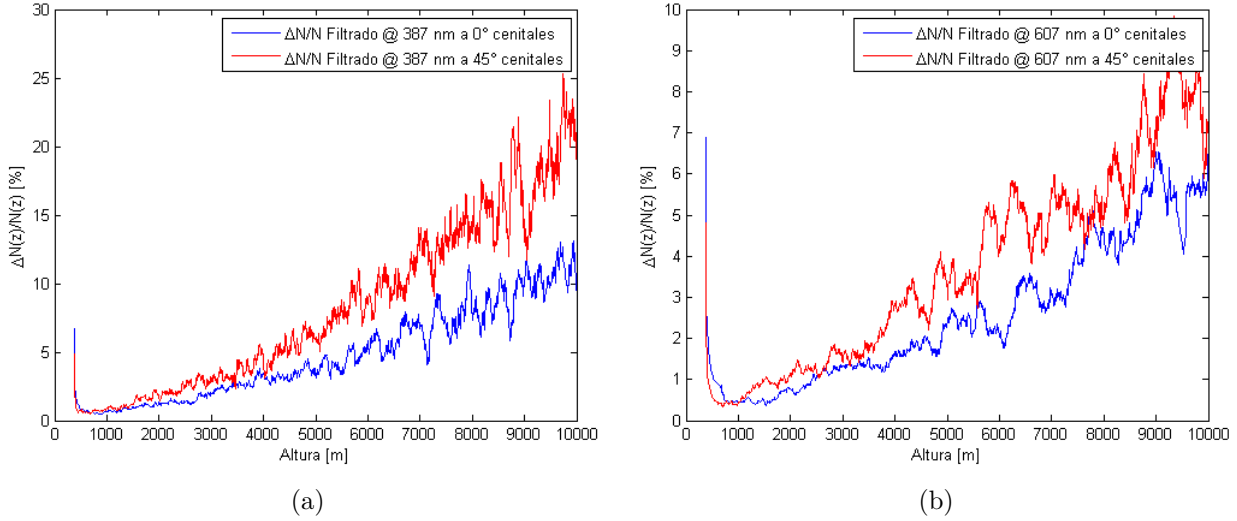


Figura 7.4.10: Errores de la señal Raman luego de un filtrado de media móvil.

Se observa una reducción del ruido en comparación con el de la señal sin filtrar (figura 7.4.7), pero aun así, mayores a los del método implementado para este trabajo (figuras 7.4.4 y 7.4.9). Normalmente, para mejorar el filtrado en este tipo de señales se utilizan altos tiempos de promediación, los cuales no son aplicables en este trabajo.

7.5. Conclusiones

Se desarrolló en este capítulo un método que permite automatizar el pre-procesamiento de los datos del lidar Raman multiángulo. Se presentaron los conceptos del algoritmo el cual permite el filtrado del ruido aleatorio y la detección de las zonas moleculares en la señal lidar. Este método brinda grandes ventajas en las señales Raman, ya que permite un procesamiento mucho más simple al momento de la inversión. Además, minimiza los altos niveles de ruido aleatorio que introducen los bajos tiempos de promediación necesarios para este trabajo. Otra ventaja de método es que posee un sólo parámetro de entrada: el ancho de la ventana de barrido, el cual, es un parámetro de fácil elección.

Las ventajas de este método de filtrado son apreciadas en la inversión de las señales, las cuales serán tratadas en el capítulo 8.

Capítulo 8

Inversión y análisis de errores de las señales elásticas y Raman del lidar multiángulo

8.1. Introducción

En base a las características del sistema lidar construido y las señales que detecta, se tiene la posibilidad de implementar tres métodos de inversión: elástica, a dos ángulos (TAM) y Raman. Cada uno de estos métodos posee características particulares, cuyo error aparejado es analizado para que cumplan con el límite impuesto por los Observatorios (capítulo 1 sección 1.3). Se realiza en este capítulo un estudio del error máximo relativo de la transmisión aerosólica $\Delta T/T$ para confirmar que está por debajo del límite máximo impuesto.

El desarrollo de este capítulo se divide en tres partes principales:

1. Descripción de los métodos de inversión de las señales lidar para la obtención de los parámetros atmosféricos buscados.
2. Cálculo de los errores. Se analizan por medio de simulaciones la propagación de los errores aleatorios y sistemáticos en los resultados de cada método de inversión.
3. Inversión de señales adquiridas para casos particulares.

En cuanto al primer punto, se hará hincapié en las ventajas y desventajas de cada método, como en las consideraciones que deben tomarse para la aplicación de los mismos.

En cuanto al punto número 2, se desarrollan métodos prácticos de propagación de errores en los resultados de la inversión, considerando el ruido aleatorio de cada señal lidar luego de su filtrado y los sistemáticos propios de cada método.

8.2. Inversión de señales lidar para la obtención de la transmisión atmosférica

Se resumen en esta sección los métodos de inversión clásicos utilizados para la obtención del espesor óptico y la transmisión de las partículas atmosféricas. Se centrará el estudio en las expresiones de la inversión, y las características conceptuales de la misma. También, se remarcarán las consideraciones que deben tomarse para la aplicación de las ecuaciones expresadas.

Los principales parámetros atmosféricos que se buscan en este trabajo son el espesor óptico de aerosoles (AOD) y su transmisión (T_p), ambos en el rango 0-3 km (ver capítulo 1). Debido a esto, se expresarán las inversiones de cada método priorizando la obtención de estos parámetros. También, se estudiarán los perfiles de extinción para zonas de media-alta tropósfera, relevando perfiles de posibles plumas de aerosoles o nubes.

8.2.1. Método de inversión de la señal lidar elástica

La literatura acerca de la inversión de la señal lidar elástica es muy variada, siendo gran parte de ellas, modificaciones a la solución de radares meteorológicos planteadas por Hitschfeld y Bordan en 1954 [127]. Al comienzo de la era lidar, incentivados por el desarrollo del láser, surgieron diversos métodos de análisis de las señales elásticas [128] [129] [130] [131] [132]. Durante estos inicios, aproximadamente desde 1967 al 1972, era necesario el conocimiento de la constante de instrumental del lidar (K_i), debiendo tener el sistema calibrado para la correcta obtención de los perfiles.

Debido a que la única ecuación que describe la señal lidar elástica posee dos incógnitas ($\alpha^p(r)$ y $\beta^p(r)$), es imprescindible para su procesamiento la sinergia con otros instrumentos, generalmente radiómetros que aporten el valor del espesor óptico. Los datos de los parámetros moleculares ($\alpha^m(r)$ y $\beta^m(r)$) son obtenidos por medio de datos de presión y temperatura provenientes de radiosondeos o modelos que se adapten a la atmósfera del lugar.

Para mayor claridad, se expresa nuevamente la ecuación lidar 1.1.3 presentada en el capítulo 1. La misma contempla una atmósfera heterogénea formada por moléculas y aerosoles:

$$P(r) = K_i \frac{O(r)}{r^2} [\beta^m(r) + \beta^p(r)] e^{-2 \int_0^r [\alpha^m(r) + \alpha^p(r)] dr} \quad (8.2.1)$$

Reordenando para un proceder más cómodo, se expresa corregida en rango, denominada en este trabajo como $S(r)$:

$$P(r).r^2 = S(r) = K_i O(r) [\beta^m(r) + \beta^p(r)] e^{-2 \int_0^r [\alpha^m(r) + \alpha^p(r)] dr} \quad (8.2.2)$$

en donde el factor K_i es la constante de instrumental, y posee la energía del láser y las eficiencias ópticas de emisión y recepción del sistema. Este parámetro es muy difícil de caracterizar, además de que es factible de sufrir variaciones con el tiempo. Para esta tesis, la idea de trabajar con la constante K_i no es considerada como opción, ya que las tareas de calibración son muy complejas, y la obtención de su valor implican problemas prácticos muy grandes, ya que no sólo se debe medir la energía del láser, si no también las eficiencias ópticas de todo el sistema a las diferentes longitudes de onda de trabajo. Por lo tanto, para independizarse de esta contante, se normaliza la señal lidar a una altura de referencia (r_m), la cual, es tomada en un punto donde las componentes aerosólicas sean despreciables frente a la molecular, y el factor de *overlap* igual a uno. Esto es:

$$\frac{S(r)}{S(r_m)} = S^n(r) = \frac{[\beta^m(r) + \beta^p(r)]}{\beta^m(r_m)} . e^{-2 \int_{r_m}^r [\alpha^m(r) + \alpha^p(r)] dr} \quad (8.2.3)$$

donde el super-índice n hace referencia a “normalizado”, y el sub-índice r es por “referencia”, donde es una altura la cual se considera $\beta^t(r_m) \rightarrow \beta^m(r_m)$. Sobre la elección de este punto de referencia, el cual debe ser molecular puro, se toma de la zona molecular detectada automáticamente mediante el método descrito en el capítulo 7. Esto minimiza el error en la elección de este punto, el cual, en caso de no cumplir con la condición de atmósfera libre, agrega sistemáticos en los resultados de la inversión.

El método de inversión Klett-Fernald-Sasano [132][133][134] permite la inversión de la ecuación 8.2.3, obteniendo los perfiles de $\alpha^p(r)$ y $\beta^p(r)$. Para esto, es necesario tener en cuenta dos consideraciones muy fuertes:

- Los perfiles moleculares de $\alpha^m(r)$ y $\beta^m(r)$ son datos. Esto deben ser obtenidos por medio de radiosondeos locales o modelos de atmósfera que se adapten al lugar de la medición.
- Conocer o estimar una relación **constante** entre $\alpha^p(r)$ y $\beta^p(r)$, la cual se denomina **razón lidar** (*lidar-ratio*). Esta relación depende del *tipo* y composición del aerosol, asumiendo que no cambia a lo largo de toda la señal medida, por lo que los cambios en el perfil se deben a su densidad numérica. Este es la principal fuente de error sistemático en este método de inversión.

Con estos datos, previamente definidos, las expresiones $\alpha^p(r)$ y $\beta^p(r)$ se pueden obtener por medio de las expresiones:

$$\alpha^p(r) = \frac{S^n(r) e^{-\Phi(r)}}{\frac{k^p}{\beta^m(r_m)} - 2 \int_{r_m}^r S^n(r) e^{-2 \int_{r_m}^r k^m \left(\frac{k^m}{k^p} - 1\right) dr} dr} - \alpha^m(r) \quad (8.2.4)$$

$$\beta^p(r) = \frac{S^n(z) e^{-\Phi(r)}}{\frac{1}{\beta^m(r_m)} - \frac{2}{k^p} \int_{r_m}^r S^n(r) e^{-\Phi(r)} . dr} - \beta^m(r) \quad (8.2.5)$$

donde:

$$k^m = \frac{\beta^m(r)}{\alpha^m(r)} = \frac{3}{8\pi}$$

$$k^p = \frac{\beta^p(r)}{\alpha^p(r)} = cte$$

y la denominada función de fase $\Phi(r)$ esta dado por:

$$\Phi(r) = 2 \left(\frac{k^m}{k^p} - 1 \right) \int_{r_m}^r \alpha^m(r) dr$$

Cabe aclarar en este punto algunas consideraciones con respecto a la estabilidad de la inversión. Como se puede observar en las expresiones 8.2.4 y 8.2.5, el denominador posee una resta, la cual, puede tornar a la solución inestable si su valor tiende a cero. Esta estabilidad depende fuertemente del punto de referencia tomado (r_m), principalmente cuando su valor es bajo ($(r < r_m)$). Bajo esta condición, el denominador de dichas ecuaciones será una resta a lo largo de la mayor parte de los valores adoptados por r , poniendo en riesgo la estabilidad de la inversión. Otro punto negativo de esta elección es que se debe tener la certeza de estar en zona molecular, ya que se necesita el valor de $\beta^m(r_m)$. El punto positivo para valores bajos de r_m es debido a los altos valores de relación S/R que se posee la señal. Este método es comúnmente llamado *near-end-solution*. Para el caso donde se toma un valor de referencia a un rango lejano, denominado *far-end-solution*, se poseen de la misma manera ventajas y desventajas. Como ventaja, al considerar $r_m > r$ a lo largo de la mayor parte de la integral, el signo - del denominador se transformará en +, haciendo el procedimiento más estable. Además, en este punto se tiene mayor certeza de estar en una zona molecular pura (siempre que no se elija un punto dentro de una pluma de aerosol o nube). Como punto negativo, es que la relación S/R es menor, por lo que se deberá promediar su valor en un entorno del punto. Esta solución es la más utilizada para la elección del punto de referencia. En este trabajo, se ha realizado un algoritmo capaz de detectar las zonas moleculares en la señal lidar, y por lo tanto, el punto de referencia óptimo. Este procedimiento fué descrito en el capítulo 7.

Para esta inversión, se deberá estimar el valor de la relación aerosólicas k^p , u obtenerlo con datos adicionales provenientes de otros equipos. Además, la consideración de adoptarla como constante es válido para un solo tipo de aerosol, lo cual es difícil encontrarse con situaciones que respondan a estas características. Debido a que comúnmente se posee una mezcla de aerosoles, principalmente en la capa límite atmosférica, esta relación adopta

diferentes valores dentro de la misma, siendo función del rango ($k^p(r)$). Cabe aclarar que, tanto $\alpha_\lambda^p(r)$, $\beta_\lambda^p(r)$ y su relación k_λ^p , son características intrínsecas de las partículas, las cuales dependen de las propiedades microfísicas de las mismas. Por lo tanto, no dependen de la **cantidad**, sino del **tipo** de aerosol.

Al considerar constante este parámetro, se está suponiendo el caso hipotético de poseer un sólo tipo de partícula en todo el rango de medición de la señal. Además, la humedad relativa es también un parámetro que modifica esta relación. Estas consideraciones son las fuentes de error sistemático más grande en esta inversión. Este método fue el utilizado en las primeras mediciones de la División Lidar [10] [135], siendo el más utilizado alrededor del mundo, principalmente debido a ser el de *hardware* más simple. Luego, se modificó el sistema para otorgarle capacidades de detección de líneas Raman [136] [21].

El procedimiento más aceptado para la obtención de esta constante es contando con la información del AOD en el momento de la medición. Generalmente, esta información es provista por mediciones radiométricas, pero este sistema lidar multiángulo cuenta con la capacidad de obtener dicha información sin la necesidad de instrumental externo. Esto es posible por medio de dos técnicas diferentes con las que cuenta: inversión a dos ángulos (sección 8.2.2) e inversión Raman (sección 8.2.3).

El análisis de errores sistemáticos en la inversión elástica ha sido discutido por varios autores [137][138][49][125]. Sin embargo, la estimación práctica de los mismos sigue siendo muy difícil, y las estimaciones convencionales no proveen necesariamente un minucioso conocimiento de como las diferentes fuentes de error se comportan en diferentes condiciones atmosféricas [16]. Como se desarrolló en la sección 8.2.1, la inversión elástica requiere de consideraciones *a-priori* para su inversión, como la relación k^p como constante. Esto conduce a errores los cuales serán función de las condiciones reales de la atmósfera, y de lo cercano o no de esta consideración con la realidad. La incerteza en la elección de este parámetro como constante, y su valor, hace al error sistemático más importante de este método. Al utilizar el AOD como condición de contorno reduce esta incerteza, logrando cumplir con la condición de la integral del perfil de $\alpha^p(z)$ invertido. La consideración de una relación lidar como constante trae aparejado el hecho de asumir que la distribución de tamaño no cambia con la altura, por lo que las variaciones en los perfiles de $\alpha^p(z)$ y $\beta^p(z)$ son debidos al cambio de la densidad de las partículas. Para la elección de esta constante, los métodos más comunes son:

- Elegir una razón lidar *a-priori*, basada en bibliografía con datos del lugar de medición, la cual caracteriza la constante k^p en función del tipo de aerosol.
- Obtener dicha constante por medio de un análisis sinérgico entre el lidar y el dato del AOD provisto por otros instrumentos. Este método se basa en la aplicación de la ecuación 8.2.4, para diferentes valores de k^p , escogiendo el valor que minimice el error entre la integral de $\alpha^p(z)$ con el AOD del radiómetro calibrado.

La elección de este parámetro como constante es la más crítica dentro de los errores sistemáticos de la inversión elástica. Esto es así debido a que dependen de las propiedades microfísicas, químicas y morfológicas de las partículas, como también, de la humedad relativa, la cual es variable con la altura. Todas estas variables hacen de la estimación de dicha relación un gran problema a la hora de invertir las señales elásticas. La obtención de la misma con la ayuda de valor del AOD, resulta una primera aproximación al valor real, siendo el método más aceptado mundialmente para este tipo de inversión. Numerosos estudios teóricos y experimentales demuestran la dependencia de k^p en función de diversos estados atmosféricos [139] [140] [141]. En ellos se informa que los valores típicos de k^p para

la atmósfera terrestre se encuentran por debajo de $0,05 \text{ sr}^{-1}$, correspondiendo a partículas cuyo tamaño es mayor o cercano a la longitud de onda utilizada para su estudio. También se han realizado estudios teóricos por medio de simulaciones, como en [142] y [143]. En este último, se realiza un análisis del error al considerar k^p como constante, ampliando el estudio realizado por [144] y [145]. En este análisis se obtiene que para atmósferas poco turbias (AOD bajos), el coeficiente de extinción obtenido ($\alpha^p(r)$) por medio de un k^p constante es inversamente proporcional al $k^p(r)$ real de la atmósfera, mientras que para atmósferas turbias (AOD altos), el coeficiente $\alpha^p(r)$ obtenido con un $k^p = cte$ tiende al perfil real. Esto hace que este método sea poco adecuado para la implementación en este trabajo, ya que el cielo de los Observatorios Pierre Auger y CTA poseen atmósferas muy limpias. Todos los estudios realizados en las publicaciones citadas son por medio de simulaciones, comparando los resultados invertidos con los perfiles de entrada definidos. En [125] se concluye que el error relativo en el perfil de $\alpha^p(r)$ se encuentra entre el 10-20 %. Estos resultados son obtenidos de manera numérica, ya que las expresiones de la propagación de errores de la ecuación 8.2.4 es muy compleja. Además, para la implementación de este método, es necesario de información de los AOD para la estimación de k^p , el cual, deberá considerarse constante. Esto trae aparejados los errores descritos anteriormente, ya que difícilmente se cumpla con esa condición en la realidad.

El lidar de este trabajo es capaz de obtener los AOD por medio del método TAM, siendo independiente de instrumentos externos y con consideraciones *a-priori* menos exigentes. Este método será desarrollado a continuación.

8.2.2. Método de inversión de la señal elástica a dos ángulos (TAM: Two Angle Method)

Se describe a continuación el método de inversión a dos ángulos, o TAM, según sus siglas en inglés. Este método, posee ventajas en cuanto a no necesitar de datos provenientes de instrumentos externos, como tampoco de la necesidad de dar un valor *a-priori*, como el k^p . Sin embargo **requiere de la condición de homogeneidad atmosférica**, la cual debe cumplirse para evitar errores sistemáticos. Se expresa esta condición como:

$$\beta^{\Theta_1}(z) = \beta^{\Theta_2}(z) = \beta^{\Theta_3}(z) = \dots = \beta^{\Theta_n}(z) = cte \quad (8.2.6)$$

$$\alpha^{\Theta_1}(z) = \alpha^{\Theta_2}(z) = \alpha^{\Theta_3}(z) = \dots = \alpha^{\Theta_n}(z) = cte \quad (8.2.7)$$

y también:

$$\frac{AOD(z)}{\cos(\Theta_1)} = \frac{AOD(z)}{\cos(\Theta_2)} = \frac{AOD(z)}{\cos(\Theta_3)} = \dots = \frac{AOD(z)}{\cos(\Theta_n)} = cte \quad (8.2.8)$$

donde

Θ : ángulo cenital de la medición.

z : altura.

$AOD(z)$: espesor aerosólico vertical. La expresión $AOD(z)/\cos(\Theta_n)$ es la atenuación óptica a lo largo de un camino inclinado con un ángulo cenital Θ , y bajo la suposición de atmósfera homogénea.

El estudio del error que se comete al no cumplirse la condición de homogeneidad es realizado en la sección 8.3.1.2.

Se plantea el set de ecuaciones lidar elásticas adquiridas en la vertical y a un ángulo Θ . Expresando ambas señales en función de la altura z , y obviando por cuestiones de simplicidad el factor de *overlap* se tiene:

$$\begin{cases} P_v(z) = K_i \frac{(\beta^m(z) + \beta^p(z))}{z^2} T_m^2(z) T_p^2(z) \\ P_s(z) = K_i \frac{(\beta^m(z) + \beta^p(z))}{z^2 / \cos^2(\Theta)} T_m^{2/\cos(\Theta)}(z) T_p^{2/\cos(\Theta)}(z) \end{cases} \quad (8.2.9)$$

donde

K_i : constante de instrumental.

z : altura.

$\beta^m(z)$: coeficiente de *backscattering* molecular.

$\beta^p(z)$: coeficiente de *backscattering* aerosólico.

Θ : ángulo cenital.

$P_v(z)$: señal lidar elástica medida en la vertical.

$P_s(z)$: señal lidar elástica medida en un ángulo cenital Θ .

$T_m^2(z)$: transmisión de las moléculas del aire elevado al cuadrado.

$T_p^2(z)$: transmisión de los aerosoles elevado al cuadrado.

Con el set de ecuaciones planteado, se procede a realizar el cociente de las mismas y despejar $T_p(z)$. Se plantea para esta tesis las expresiones de $T_p(z)$ y $AOD(z)$ a la altura de referencia $z_m = 3 \text{ km}$. Se obtiene:

$$T_p(z_m) = {}^{2.C} \sqrt{\frac{P_v(z_m)}{P_s(z_m)} \cdot \frac{\sqrt[2]{\cos(\Theta)}}{T_m(z_m)}} \quad (8.2.10)$$

$$AOD(z_m) = -\log(T_p(z_m)) \quad (8.2.11)$$

donde $C = 1 - \frac{1}{\cos(\Theta)}$

En una primera impresión, este método presenta una simpleza muy grande frente al método convencional de inversión elástica. De todas maneras, es necesario analizar los errores que se pueden cometer si no se cumple con la condición de homogeneidad atmosférica, como también la propagación del ruido de la señal lidar, las cuales, imponen condiciones acerca del ángulo Θ . Estos errores pueden ser muy grandes [16] si no se toman las consideraciones necesarias. Este análisis se realizará en la sección 8.3.1.2.

Un detalle importante, es que por medio de las ecuaciones 8.2.10 y 8.2.11, se obtienen los valores de $T_p(z_m)$ y $AOD(z_m)$ desde la altura de 0 m, sin contar con el problema del *overlap* a alturas menores. Es importante remarcar una característica acerca de la elección de z_m , la cual, para reducir el error sistemático debido a la inhomogeneidad aerosólica debe ser seleccionada en zona molecular. De ser así, esta condición sólo deberá considerarse para la atenuación atmosférica ($\alpha_p(z)$), ya que en zona molecular el parámetro de *backscattering* ($\beta_p(z)$) es considerado nulo. En caso contrario, si se selecciona la altura dentro de la capa límite, el planteo de inhomogeneidad será también para β_p , aumentando los errores sistemáticos. Esto puede resolverse con el uso de señales Raman, como se analizará en la siguiente sección (8.2.3).

Existe también el método de inversión multiángulo, cuyo procedimiento es una versión extendida del método TAM, que por medio de la adquisición de varias señales a diferentes ángulos permite la reducción del **error aleatorio**, pero no del sistemático [16]. En este trabajo sólo será aplicado el método TAM, principalmente por su simpleza de cálculo, y para realizar mediciones más rápidas, evitando invertir tiempo en el escaneo del sistema.

8.2.3. Método de inversión de la señal lidar Raman

La técnica lidar Raman permite solucionar el problema de la inversión elástica, la cual posee una sola ecuación con dos incógnitas, como también, prescindir de las consideraciones de homogeneidad horizontal necesarias para el método TAM. Además, este método de inversión permite obtener los parámetros atmosféricos a cualquier ángulo cenital, evitando los errores sistemáticos debido a la inhomogeneidad de los aerosoles. Los errores sistemáticos de este método están relacionados a la elección del coeficiente de Ångström, el cual, será analizado en la sección 8.3.2.2. Las características de esta inversión será utilizada en este trabajo para el procedimiento *Shot-the-Shower* de los Observatorios, el cual se necesitan los parámetros ópticos a un determinado ángulo.

Se reescribe a continuación la ecuación lidar Raman corregida en rango:

$$P(\lambda_L, \lambda_R, r) \cdot r^2 = S^R(r) = K_i O(r) \beta^R(\lambda_L, \lambda_R, r) e^{-\int_0^r [\alpha^t(\lambda_L, r) + \alpha^t(\lambda_R, r)] r dr} \quad (8.2.12)$$

donde:

$P(\lambda_L, \lambda_R, r)$: señal detectada por el canal Raman de la longitud de onda λ_R , excitado por la longitud de onda láser λ_L .

K_i : constante de instrumental.

$\beta(\lambda_L, \lambda_R, r)$: coeficiente de retrodispersión del dispersor Raman en estudio (para este trabajo, N_2). Este es un dato conocido, el cual se obtiene de datos de radiosondeos, de la misma manera que el perfil de *backscattering* molecular $\beta^m(r)$.

$\alpha^t(\lambda_x, r) = \alpha^m(\lambda_x, r) + \alpha^p(\lambda_x, r)$: coeficiente de extinción total (moléculas + aerosoles) para la longitud de onda correspondiente a λ_x ; con x igual a L o R , según corresponde a la longitud de onda láser (L) o Raman (R).

$O(r)$: factor de *overlap*.

En la expresión 8.2.12 se observa que las únicas incógnitas son los coeficientes de extinción aerosólicos a las longitudes de onda elásticas y Raman, las cuales, se las relaciona a través de la ley de Ångström, descrita en el capítulo 2 sección 2.3.2.1. Mediante esta ley, es posible relacionar 2 perfiles de extinción por medio del coeficiente $\tilde{a}$:

$$\frac{AOD_{\lambda_R}}{AOD_{\lambda_L}} = \frac{\alpha_{\lambda_R}^p(r)}{\alpha_{\lambda_L}^p(r)} = \left(\frac{\lambda_R}{\lambda_L} \right)^{-\tilde{a}} \quad (8.2.13)$$

Por lo tanto, haciendo uso de la ecuación 8.2.12 y la relación 8.2.13, se obtienen la expresión para $\alpha_p(r)$ a la longitud de onda láser (λ_L) [146]:

$$\alpha_p(r, \lambda_L) = \frac{\frac{d}{dr} \ln \left(\frac{N_R(r)}{P(\lambda_L, \lambda_R, r) r^2} \right) - \alpha^m(r, \lambda_L) - \alpha^m(r, \lambda_R)}{1 + \left(\frac{\lambda_R}{\lambda_L} \right)^{-\tilde{a}}} \quad (8.2.14)$$

Tanto la densidad numérica del dispersor (nitrógeno, N_R) como los perfiles moleculares a las longitudes de onda Raman y elástica ($\alpha^m(r, \lambda_L)$ y $\alpha^m(r, \lambda_R)$) son datos obtenidos con información de radiosondeos.

El mayor problema que se presenta al momento de aplicar la ecuación 8.2.14 es su procesamiento numérico, ya que la derivada del logaritmo que se observa en el numerador genera grandes inconvenientes en señales ruidosas. El pre-procesamiento de la señal descrito en el capítulo 7, soluciona en gran medida este problema.

Otro inconveniente de la aplicación de la expresión 8.2.14 es que el perfil de $\alpha^p(r, \lambda_L)$ obtenido estará limitado por el factor de *overlap*, por lo que no se podrá obtener información de la parte baja de la atmósfera.

La expresión de la transmisión óptica de los aerosoles ($T_p(r)$) se obtiene a partir de la ecuación 8.2.12, evitando pasar por cálculo de $\alpha^p(r)$ (expresión 8.2.14) y sus respectivos problemas numéricos. Para despejar $T_p(r)$ es necesario la eliminación de la constante de instrumental K_i , ya que su valor no se conoce y es de difícil caracterización. Para independizarse de K_i , se procede de la misma manera que en la inversión elástica: normalizando a una altura de referencia r_r . La consecuencia de esto es una normalización de las transmisiones molecular y aerosólica a la altura r_r .

Por lo tanto, normalizando la ecuación 8.2.12 se obtiene:

$$\begin{aligned} \frac{S^R(r)}{S^R(r_r)} &= \frac{\beta^R(\lambda_L, \lambda_R, r)}{\beta^R(\lambda_L, \lambda_R, r_r)} \cdot e^{-\int_{r_r}^r [\alpha^t(\lambda_L, r) + \alpha^t(\lambda_R, r)] r dr} \\ &= \frac{\beta^R(\lambda_L, \lambda_R, r)}{\beta^R(\lambda_L, \lambda_R, r_r)} \cdot e^{-\int_{r_r}^r [\alpha^m(\lambda_L, r) + \alpha^m(\lambda_R, r)] r dr} \cdot e^{-\int_{r_r}^r [\alpha^p(\lambda_L, r) + \alpha^p(\lambda_R, r)] r dr} \end{aligned}$$

utilizando la ley de Ångström (ecuación 8.2.13) se logra relacionar $\alpha^p(\lambda_L, r)$ y $\alpha^p(\lambda_R, r)$ y poder despejar la **transmisión normalizada** de los aerosoles a la longitud de onda láser:

$$T_p^{norm}(r_r - r) = e^{-\int_{r_r}^r \alpha^p(z) dz} = \left(\frac{S^R(r)}{S^R(r_r)} \cdot \frac{\beta^R(\lambda_L, \lambda_R, r_r)}{\beta^R(\lambda_L, \lambda_R, r)} \cdot \frac{1}{T_m^{norm}(r)} \right)^{1/p} \quad (8.2.15)$$

donde:

$$p = 1 + \left(\frac{\lambda_R}{\lambda_L} \right)^{-\tilde{a}}$$

Finalmente, para incrementar el rango de aplicación de la expresión 8.2.15, es necesario reemplazar a r por el rango más bajo que permita el perfil lidar adquirido, el cual para este sistema es 1000 m (ver figura 6.4.3 del capítulo 6). Esto es debido a que luego de la normalización, la integral de la transmisión queda referenciada a r_r , en vez de 0 m. Para $r < r_r$, se tiene:

$$\begin{aligned} T_p^{norm}(r_r - r) &= e^{-\int_{r_r}^r \alpha^p(r) dr} \\ T_p^{norm}(r - r_r) &= e^{\int_{r_r}^r \alpha^p(r) dr} = \frac{1}{e^{-\int_{r_r}^r \alpha^p(r) dr}} \\ T_p^{norm}(r - r_r) &= \frac{1}{T_p(r - r_r)} \end{aligned}$$

Por lo que la transmisión en el intervalo $r - r_r$ esta dada por:

$$T_p(r - r_m) = \frac{1}{T_p^{norm}(r - r_m)} \quad (8.2.16)$$

Finalmente, para obtener la transmisión aerosólica total del método Raman, se reemplaza $r = 1000\text{ m}$ en 8.2.16:

$$T_p(1\text{km} - 3\text{km}) = \frac{1}{T_p^{norm}(1\text{km} - 3\text{km})} \quad (8.2.17)$$

Queda en evidencia la dependencia del resultado de esta inversión en función del rango útil de la señal lidar (limitada por el factor de *overlap*). Esto genera un problema serio en cuanto al resultado final entregado, ya que se pierde una parte importante de la capa límite atmosférica, la cual aporta un valor que no se debe despreciar en el cálculo de los parámetros ópticos totales. Esto toma mayor relevancia en los sitios donde será instalado este lidar, ya que la altura de la capa límite de aerosoles puede ser muy baja, por lo que no contar con la información de los 1000 m iniciales introduce un error significativo en el resultado final. Por lo tanto, se utilizará este método para relevar inhomogeneidades que se encuentren a más de 1000 m del lidar, contando con la capacidad de realizarlo en cualquier ángulo cenital. Esto da la capacidad de medición de la transmisión de plumas de aerosoles o nubes por encima de la capa límite atmosférica.

En cuanto a la constante de Ångström ($\text{\AA}$), es posible obtenerla con información de dos espesores ópticos a diferentes longitudes de onda, despejándola de la ecuación 8.2.13. En este trabajo, se adopta el valor de 0,75, el cual corresponde a los aerosoles desérticos (capítulo 2, sección 2.3.2.3). El coeficiente de Ångström es muy útil para la caracterización óptica de los aerosoles, tomando valores entre 0 y 4 [81][82]. Los valores típicos para los aerosoles varían entre 0,5 y 2,5, llegando adoptar un valor de 4 para el caso molecular. De todas maneras, es muy común encontrar en diferentes bibliografías que se define este coeficiente como 1 [146], ya que el error sistemático que aporta en el perfil de $\alpha^p(r)$ no supera el 5 % por cada bin. El análisis de sus errores será desarrollado en la sección 8.3.2.

8.2.4. Conclusiones acerca de los métodos de inversión.

Descripción del método de inversión integral a utilizar

En las secciones anteriores se han planteado las ventajas y desventajas de cada método de inversión disponible en el lidar realizado. De manera resumida, se pueden extraer las siguientes conclusiones de cada método:

Método de inversión	Ventajas	Desventajas
Elástico clásico	Sólo presenta buenos resultados en casos de poca variabilidad de k_p con respecto al rango, o en atmósferas muy turbias .	Errores sistemáticos muy grandes debidos a la suposición de k_p como constante. Resultados de la inversión válidos en el rango útil de la señal. Se necesita de la sinergia con otro instrumento para la obtención de k_p .
Two Angle Method (TAM)	Se obtienen los parámetros integrados ($T_p(z)$ y $AOD(z)$) desde 0 m. Expresiones muy simples de resolver numéricamente.	Condición <i>a-priori</i> de homogeneidad aerosólica, la cual, en caso de no cumplirse, aumenta el error sistemático de la inversión.
Raman	Bajos errores sistemáticos debido a coeficiente de Ångström. Permite la obtención de los parámetros atmosféricos a cualquier ángulo de medición.	Errores aleatorios altos por lo que sus señales requieren de un pre-procesamiento y filtrado.

Cuadro 8.2.1: Resumen de las ventajas y desventajas de los diferentes métodos de inversión disponibles en este lidar Raman multiángulo.

En base al último cuadro (8.2.1), se plantea el procedimiento de inversión desarrollado en esta tesis, el cual hace uso de las ventajas de cada método. Este método está basado en los siguientes puntos:

- Obtención de la transmisión aerosólica $T_p(z)$ en el rango de 0-3 *km*.
- Independencia de datos externos para la inversión.
- Simpleza numérica de las operaciones a realizar.
- Cumplimiento de la condición de error relativo máximo en el dato de la transmisión aerosólica $\Delta T_p/T_p$ menor al 3 %.

El análisis de los errores, y la propagación de los mismos a lo largo de este procedimiento, como también los resultados de los parámetros ópticos obtenidos, se tratarán en las siguientes secciones.

8.3. Caracterización de los métodos de inversión. Aplicación en señales sintéticas y caracterización por medio de la propagación de sus errores alea- torios y sistemáticos

Se analiza en esta sección los errores de cada método de inversión utilizados: TAM y Raman. El error de cada método se dividirá en dos categorías: 1) propagación del error aleatorio de la señal lidar en los resultados de la inversión, y 2) errores sistemáticos debido a la incerteza del parámetro de entrada de cada método.

En este estudio se utilizan simulaciones para controlar los parámetros que se desean estudiar: el error aleatorio y la inhomogeneidad atmosférica. Se consideran los errores aleatorios de las señales lidar a los obtenidos **luego de su filtrado**, como se muestran en las figuras 7.4.4 y 7.4.9 del capítulo 7. Si bien el método de filtrado logra bajar mucho estos errores, es necesario analizar su propagación en el método de inversión.

El análisis de propagación de los errores en los resultados de la inversión es realizado de manera numérica, aplicando un método similar al utilizado por la red Earlinet para la caracterización de sus lidars [147] [52]. Este es un método práctico basado en Monte Carlo [148], donde se evitan cálculos analíticos complejos de propagación de errores, el cual consta en invertir todo el set de señales simulado y calcular los errores del conjunto de resultados.

Se presentan los errores aleatorios y sistemáticos de la transmisión de los aerosoles (T_p) y de su espesor óptico (AOD) para cada método de inversión. Esto será representado por medio de la incertidumbre del valor invertido ΔT_p , calculada como la desviación estándar de los resultados **con respecto al valor real simulado**. Para el caso de la transmisión de las partículas, se utiliza la expresión:

$$\Delta T_p^{real} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_p^{real} - T_p^{resi})^2}{N}} \quad (8.3.1)$$

ΔT_p^{real} : Desvío de los valores invertidos con respecto al valor **real** simulado.

T_p^{real} : Valor de la transmisión de los aerosoles simulados.

T_p^{resi} : Resultado de la inversión TAM de la transmisión aerosólica para el set de perfiles *i*-ésimo.

Su error relativo $\Delta T_p^{real}/T_p^{real}$, se obtiene como el cociente de su desviación estándar (ΔT_p^{real} , ecuación 8.3.1) con respecto al **valor real simulado** (T_p^{real}). Esto es:

$$\varepsilon_{rel} = \frac{\Delta T_p^{real}}{T_p^{real}} \quad (8.3.2)$$

Los errores sistemáticos debidos a los perfiles moleculares $\alpha^m(r)$ y $\beta^m(r)$ serán descartados debido a que son obtenidos por medio de radiosondeos realizados en el mismo lugar y momento de la medición. En este caso, los errores más altos se obtienen cuando los perfiles de presión y temperatura son obtenidos por medio de modelos, siendo el error asociado no mayor al 3 % [137]. Cuando son obtenidos por medio de radiosondeos locales, lanzados el mismo día de la medición lidar, se logra reducir a no más del 1 % [149] [150]. En cuanto a la distancia con respecto al lanzamiento del radiosondeo, se recomiendan que no sean mayores a 30 km [151]. También, debido al bajo tiempo de adquisición utilizado

(10 s, ver capítulo 3) no se tendrá en cuenta los errores de procedimiento, producto del cambio de las propiedades ópticas durante la promediación temporal en la adquisición de datos.

Para las simulaciones, se utilizará una carga aerosólica mayor a la media de la atmósfera de los Observatorios en los que se enmarca este trabajo. Según se mostró en el capítulo 1, sección 1.3, los niveles medios de espesor óptico aerosólico se encuentran entre 0,04 y 0,05 para 355 nm. También en esa sección, se demostró que mayores valores de AOD representan una condición más desfavorable para el cálculo del error relativo en la transmisión de las partículas. Por lo tanto, se utilizarán valores de AOD altos, lo que permite tener un margen de seguridad para situaciones normales. Se muestran en la tabla 8.3.1 los parámetros utilizados.

Parámetro	Valor
AOD @ 355	0,1
AOD @ 532	0,074
Coeficiente de Ångström	0,75
Altura de la capa límite atmosférica	1500 m
LR @ 355	45 sr
LR @ 532	21 sr

Cuadro 8.3.1: Parámetros ópticos de los aerosoles utilizados en la simulación para la caracterización de los errores de cada método.

8.3.1. Errores de inversión del método TAM

Se analiza a continuación la propagación del error aleatorio y sistemático en los resultados de la inversión TAM.

Para el estudio numérico de estos errores se generan dos *sets* de datos, cada uno con 10 (N) señales lidar en vertical ($P_v(z)$) y en ángulo ($P_s(z)$). Cada par $P_v(z) - P_s(z)$ es procesado por medio de las ecuaciones 8.2.10 y 8.2.11 obteniendo los valores de T_p , AOD y sus correspondientes errores. Un esquema de este procedimiento se observa en la figura 8.3.1.

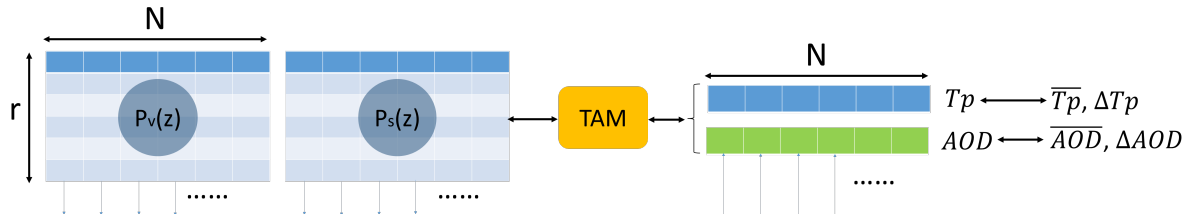


Figura 8.3.1: Secuencia esquemática del cálculo de los errores de método TAM.

Para el cálculo de los errores aleatorios, cada uno de los N perfiles del set de datos $P_v(z)$ y $P_s(z)$ sólo difieren en su ruido aleatorio, mientras que para el cálculo del error sistemático, el set de datos $P_s(z)$ es generado simulando una atmósfera inhomogénea. Estos datos son invertidos aplicando las ecuaciones correspondientes, para finalmente calcular la media y desviación estándar en el set de resultados.

8.3.1.1. Propagación del error aleatorio de la señal lidar elástica en los resultados de la inversión TAM

En el capítulo 7 se describió el método que permite la reducción del ruido aleatorio en las señales lidar adquiridas. Sin embargo, para este método de inversión, es necesario realizar un análisis de su propagación en los resultados de la transmisión y el espesor óptico aerosólico.

Antes de proceder con el cálculo numérico del error, es necesario plantear la expresión del error relativo de $T_p(z)$ para poder obtener conclusiones acerca del ángulo cenital óptimo de las señales $P_s(z)$. Partiendo de la ecuación 8.2.10, y desarrollando la propagación de los errores en función de los errores de aleatorios de $P_v(z)$ y $P_s(z)$ se obtiene:

$$\frac{\Delta T_p(z)}{T_p(z)} = \frac{1}{2.C} \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta P_v(z)}{P_v(z)}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P_s(z)}{P_s(z)}\right)^2} \quad (8.3.3)$$

donde $C = 1 - 1/\cos(\Theta)$.

Se observa que la suma en cuadratura de los errores de las señales lidar están afectadas por el factor $1/2.C$, el cual funciona como amplificación de estos errores. En la figura 8.3.2 se observa el comportamiento de este factor en función del ángulo cenital Θ .

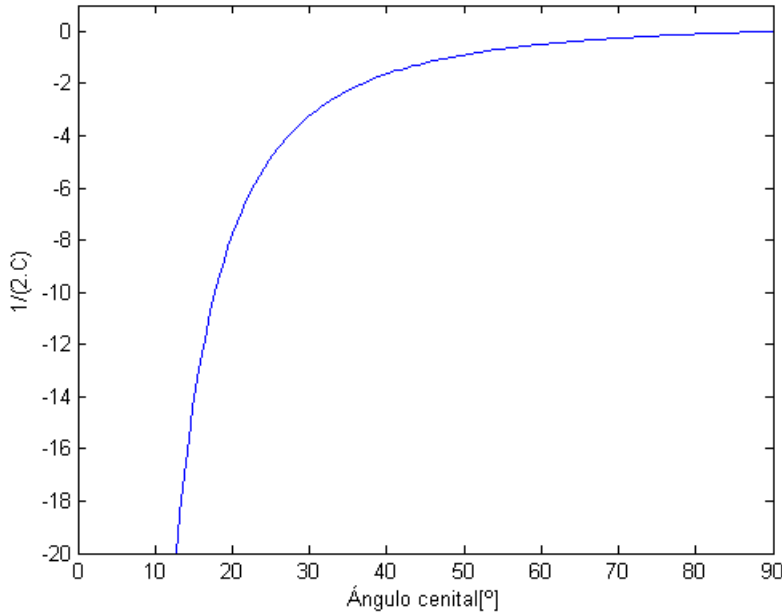


Figura 8.3.2: Factor de amplificación ($1/2C$) debido al ángulo cenital de la señal $P_s(z)$.

Este factor da cuenta de la sensibilidad del método TAM al ángulo Θ , el cual para valores bajos amplifica el error considerablemente. Esto es independiente de la inhomogeneidad atmosférica, y se debe a la cantidad de información que se puede extraer del cociente de las dos señales lidar en el proceso de inversión (ver ecuación 8.2.10), la cual es cuantificada por C . Por lo tanto, para adquisiciones a un ángulo Θ bajo, el valor de C es también bajo, aumentando el error en la inversión. En el extremo de $\Theta = 0 \Rightarrow C = 0$, el error de la inversión tiende a infinito.

Gracias al método de filtrado desarrollado en este trabajo (capítulo 7), se bajan los errores de la señal lidar ($\Delta P_x(z)/P_x(z)$) logrando que la propagación en los resultados

de la inversión sean aceptables para los márgenes de trabajo. Para definir el valor de Θ óptimo, se despeja de la ecuación 8.3.3 el error relativo de la señal en ángulo $\Delta P_s(z)/P_s(z)$, obteniendo:

$$\frac{\Delta P_s(z)}{P_s(z)} = \sqrt{\left(2.C.\frac{\Delta T_p(z)}{T_p(z)}\right)^2 - \left(\frac{\Delta P_v(z)}{P_v(z)}\right)^2} \quad (8.3.4)$$

Esta ecuación nos permite conocer el error máximo que se puede cometer con $\Delta P_s(z)/P_s(z)$ en función su ángulo (contenido en el factor C). Para proceder con la obtención del valor de Θ óptimo, se definen los límites de los errores $\Delta T_p(z_m)/T_p(z_m)$ y $\Delta P_v(z_m)/P_v(z_m)$, para **355 nm y a una altura de $z_m = 3 km$** . Se adoptan los valores de estas variables en condición desfavorable para el cálculo de $\Delta P_s(z_m)/P_s(z_m)$.

$$\begin{cases} \Delta T_p(z_m)/T_p(z_m) &= 1 \% \\ \Delta P_v(z_m)/P_v(z_m) &= 0,5 \% \end{cases} \quad (8.3.5)$$

El error relativo de la transmisión aerosólica ($\Delta T_p(z_m)/T_p(z_m)$) se escoge en base a que su error total (sumado al sistemático) no debe superar el 3 % para 355 nm (capítulo 1). En cuanto al error aleatorio de la señal lidar vertical ($\Delta P_v(z_m)/P_v(z_m)$), se escogió un valor mayor al simulado en el capítulo 7, figura 7.4.4, para obtener así un valor más exigente para $\Delta P_s(z)/P_s(z)$. Con estos datos se grafica la ecuación 8.3.4 en función del ángulo Θ , obteniendo la gráfica de la figura 8.3.5.

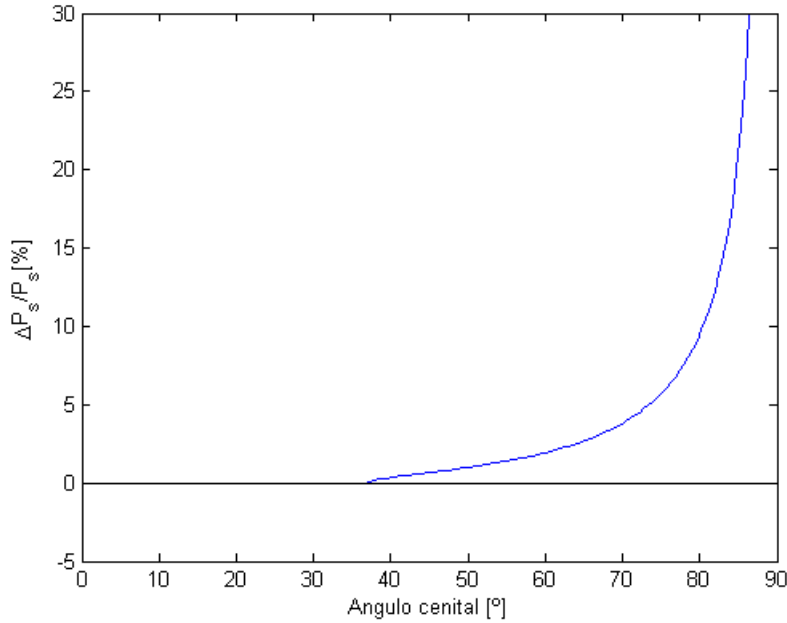


Figura 8.3.3: Error relativo máximo de la señal $P_s(z_m)$ para cumplir con las condiciones impuestas en 8.3.5. Este error es para una altura de $z_m = 3 km$.

Se observa en esta última figura (8.3.5) que no existe un valor real de $\Delta P_s(z_m)/P_s(z_m)$ para ángulos menores a 37° que cumplan con las condiciones impuestas en 8.3.5. También, que a mayores ángulos cenitales se permite un mayor error (condición menos exigente), pero no es conveniente debido a que aumenta el riesgo de incumplir con la condición

de homogeneidad atmosférica. Se define por lo tanto $\varphi = 45^\circ$, lo que significa un error máximo para $\Delta P_s(z_m)/P_s(z_m) = 0,66\%$, valor mayor del esperado en la simulación del capítulo 7, figura 7.4.4. Esto permite tener un margen para este error, pudiendo ser mayor sin superar el límite impuesto para $\Delta T_p(z_m)/T_p(z_m)$.

Con el ángulo Θ ya definido, se procede al cálculo numérico del error aleatorio en los resultados de la inversión. Se muestra en el cuadro 8.3.2 los errores aleatorios para T_p y AOD en el rango 0 - 3 km .

Errores aleatorios del método TAM para $T_p(0 - 3\ km)$		
	355 nm	532 nm
T_p^{real}	0,905	0,930
$\overline{T_p(z_m)} \pm \Delta T_p^{real}$	$0,908 \pm 0,004$	$0,928 \pm 0,005$
$\frac{\Delta T_p^{real}}{T_p^{real}}$	0,450 %	0,507 %
Errores aleatorios del método TAM para $AOD(0 - 3\ km)$		
	355 nm	532 nm
AOD^{real}	0,1	0,074
$\overline{AOD} \pm \Delta AOD^{real}$	$0,0960 \pm 0,0045$	$0,0748 \pm 0,0050$
$\frac{\Delta AOD^{real}}{AOD^{real}}$	4,508 %	6,928 %

Cuadro 8.3.2: Errores aleatorios del método TAM para la transmisión aerosólica y el AOD, para el rango de 0 a 3 km .

Se observan bajos valores de error, principalmente debidos al método de filtrado realizado, como también en los altos niveles de señal elástica obtenidos con el lidar. Estos errores aleatorios se deben sumar a los sistemáticos, los cuales dependen de la inhomogeneidad de la atmósfera.

8.3.1.2. Errores sistemáticos asociados al método de inversión TAM

En este trabajo, el error sistemático del método TAM se lo asocia a la inhomogeneidad de los aerosoles, considerando al contenido molecular como perfectamente homogéneo. En base a los estudios realizados por el Observatorio Pierre Auger, y como producto de mediciones del AOD en sus sitios de FD separados a más de 30 km , estos errores no superan el 2 % [47].

En la figura 8.3.4, se observa de forma esquemática el concepto de cómo se simula la inhomogeneidad aerosólica en este trabajo, la cual es realizada por medio del parámetro H:

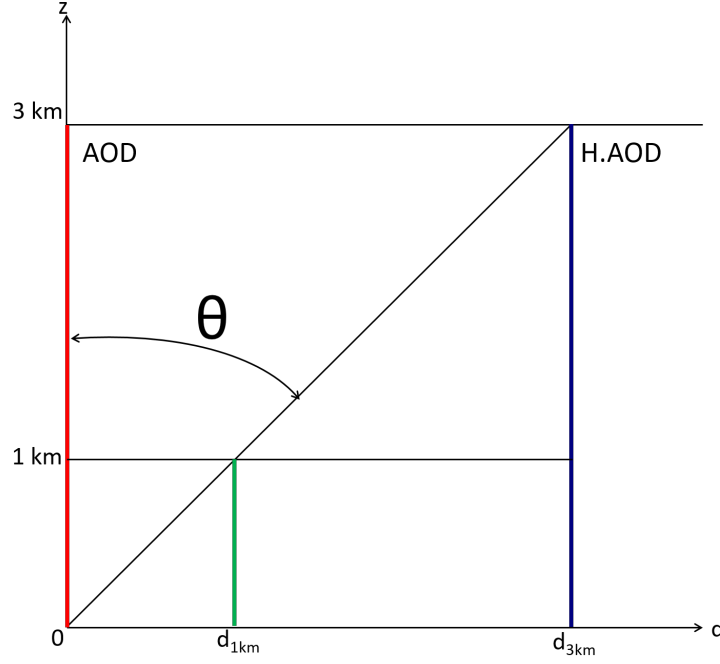


Figura 8.3.4: Esquema utilizado para representar la inhomogeneidad atmosférica en el espesor óptico atmosférico por medio del factor **H**.

Para esto, es necesario simular un set de señales inhomogéneas, en donde los parámetros ópticos de los aerosoles no sean iguales para las señales adquiridas en la vertical y en ángulo. Se caracteriza la inhomogeneidad en el set de señales por medio del factor H de la siguiente manera:

$$\begin{cases} \beta_s^p(z) &= H \cdot \beta_v^p(z) \\ \alpha_s^p(z) &= H \cdot \alpha_v^p(z) \end{cases} \quad (8.3.6)$$

donde

$\alpha_v^p(z)$ y $\beta_v^p(z)$: perfiles de extinción y *backscattering* de los aerosoles en la vertical.

$\alpha_s^p(z)$ y $\beta_s^p(z)$: perfiles de extinción y *backscattering* de los aerosoles para la medición en ángulo.

H : factor de homogeneidad. Para $H=1$, la atmósfera es homogénea, y para $H \neq 1$ se representa los diferentes niveles de inhomogeneidad.

En cuanto a la relación entre el espesor óptico vertical (AOD_v) y en ángulo (AOD_s), se puede escribir:

$$AOD_s(z) = \frac{H \cdot AOD_v(z)}{\cos(\varphi)} \quad (8.3.7)$$

Con las relaciones planteadas, se expresa a continuación el set de ecuaciones lidar simulado en función de la altura z , explicitando el factor H en el perfil inclinado $P_s(z)$:

$$\begin{cases} P_v(z) &= K_i \cdot \frac{\beta^m(z) + \beta^p(z)}{z^2} \cdot T_m^2(z) \cdot T_p^2(z) \\ P_s(z) &= K_i \cdot \frac{\beta^m(z) + H \cdot \beta^p(z)}{z^2 / \cos^2(\varphi)} \cdot T_m^2(z)^{\frac{2}{\cos(\varphi)}} \cdot T_p^{\frac{2 \cdot H}{\cos(\varphi)}} \end{cases} \quad (8.3.8)$$

Este planteo impone una condición desfavorable, ya que por ser H constante, se pesa a la inhomogeneidad de la misma manera en rangos cercanos y lejanos, cuando en realidad, es de esperar mayor grado de homogeneidad en las cercanías del lidar. En el set de ecuaciones 8.3.8 se puede observar que la inversión de este método en zonas aerosólicas será mayor que en zonas moleculares puras. Esto es debido a que en zonas aerosólicas se tiene dos parámetros inhomogéneos: α_p y β_p , mientras que en zonas moleculares puras ($\beta_p = 0$) sólo se tendrá la inhomogeneidad debido a la extinción aerosólica.

Debido a que el método TAM supone homogeneidad atmosférica (ecuación 8.2.10), los errores sistemáticos del mismo aumentarán a medida que esta suposición no se cumpla. Se analiza en este apartado el error sistemático del método para una inhomogeneidad de +4 %, la cual, es el doble de la medida por el Observatorio Pierre Auger en su sitio. Esta inhomogeneidad es observada por la señal adquirida en ángulo ($P_s(z)$ de la ecuación 8.3.8), y representada a través del parámetro $H=1,04$.

Se procede con el estudio numérico según la secuencia descrita en la figura 8.3.1. Se muestra en el cuadro 8.3.3 los valores para el rango 0-3 km.

Errores sistemáticos del método TAM para $T_p(0 - 3km)$		
	355 nm	532 nm
T_p^{real}	0,9053	0,93
$\overline{T_p} \pm \Delta T_p^{real}$	$0,8977 \pm 0,0084$	$0,9201 \pm 0,0104$
$\frac{\Delta T_p^{real}}{T_p^{real}}$	0,932 %	1,12 %

Errores sistemáticos del método TAM para $AOD(0 - 3km)$		
	355 nm	532 nm
AOD^{real}	0,1	0,074
$\overline{AOD} \pm \Delta AOD^{real}$	$0,1080 \pm 0,0094$	$0,0833 \pm 0,0113$
$\frac{\Delta AOD^{real}}{AOD^{real}}$	9,4140 %	15,3660 %

Cuadro 8.3.3: Errores sistemáticos del método TAM para la transmisión aerosólica y el AOD, en el rango 0-3 km y una inhomogeneidad de 4 %.

Estos valores reportan el error relativo cometido en la inversión TAM para una atmósfera inhomogénea (4 %) cuando se la invierte considerándola homogénea.

Se observa en el último cuadro (8.3.3) que una inhomogeneidad del 4 % introduce errores relativos mayores que los errores aleatorios.

8.3.1.3. Errores totales del método de inversión TAM

Considerando los valores obtenidos para los errores aleatorios y sistemáticos (cuadros 8.3.2 y 8.3.3), se obtiene el error total del método por medio de la suma en cuadratura. Se muestra en el cuadro 8.3.4 el error total para el rango 0-3 km, resultantes de la suma en cuadratura de los errores aleatorios (cuadro 8.3.2) y sistemáticos (cuadro 8.3.3).

Errores totales del método TAM para $T_p(0 - 3km)$		
	355 nm	532 nm
$\frac{\Delta T_p}{T_p}$	1,035 %	1,23 %

Errores totales del método TAM AOD(0 - 3km)		
	355 nm	532 nm
$\frac{\Delta AOD}{AOD}$	10,44 %	16,856 %

Cuadro 8.3.4: Errores totales (aleatorios mas sistemáticos) del método de inversión TAM.

Se observa que los errores relativos totales en la transmisión de los aerosoles se encuentran por debajo del 3 % impuesto por los Observatorios (capítulo 1, sección 1.3). Este error está gobernado por su componente sistemática, el cual es de aproximadamente el doble de su componente aleatoria.

Cabe remarcar que este método arroja los valores de transmisión como de espesor óptico **verticales, obtenidos en base a considerar a la atmósfera como homogénea**. Para conocer el espesor óptico en algún sentido en particular, se hace uso de las señales Raman. Esto es de gran utilidad para los Observatorios en los que se enmarca este lidar, ya que ante eventos de gran importancia es necesario el conocimiento de la atenuación en dirección al ingreso del rayo cósmico, dando lugar al procedimiento del lidar denominado *Shot-the-Shower*.

8.3.2. Errores de inversión del método Raman

Se analiza en esta sección la propagación de los errores aleatorios y sistemáticos en los resultados de la inversión Raman. Esta inversión es utilizada para la caracterización de la atmósfera **a cualquier ángulo cenital**, ya que para su inversión no necesita de la suposición de homogeneidad horizontal, y el parámetro de entrada necesario para su inversión (coeficiente del Ångström) no introduce grandes errores sistemáticos en los perfiles de salida. Cabe remarcar que, el método TAM descrito en la sección anterior (8.3.1), se obtienen los parámetros ópticos verticales, mientras que en este método, se puede obtener para cualquier ángulo cenital.

Como se remarcó en la sección 8.2.3, los resultados de esta inversión están limitados al rango útil de la señal lidar, la cual se obtiene luego de su corrección por *overlap*. Esto hace que los resultados obtenidos sean en un rango a partir de 1 km desde el lidar (ver capítulo 6 sección 6.4.1), lo que reduce la cantidad de aerosoles detectados dentro de la capa límite atmosférica. Esto trae aparejado una disminución del AOD medido, aumentando el error de la inversión. Por estos motivos, el método de inversión Raman es utilizado para la medición de eventuales plumas aerosólicas o nubes, o para casos particulares de medición que requieran los Observatorios en zonas de media-alta tropósfera.

Para el estudio de su error, se simula las señales Raman con una pluma de aerosoles a una altura de 6 km y a un ángulo de 45°. Se observa en la figura 8.3.5 el perfil del coeficiente de extinción $\alpha^p(r)$ y los perfiles Raman simulados ya filtrados.

Los resultados de la inversión de estas señales junto con sus errores aleatorios y sistemáticos se analizan a continuación.

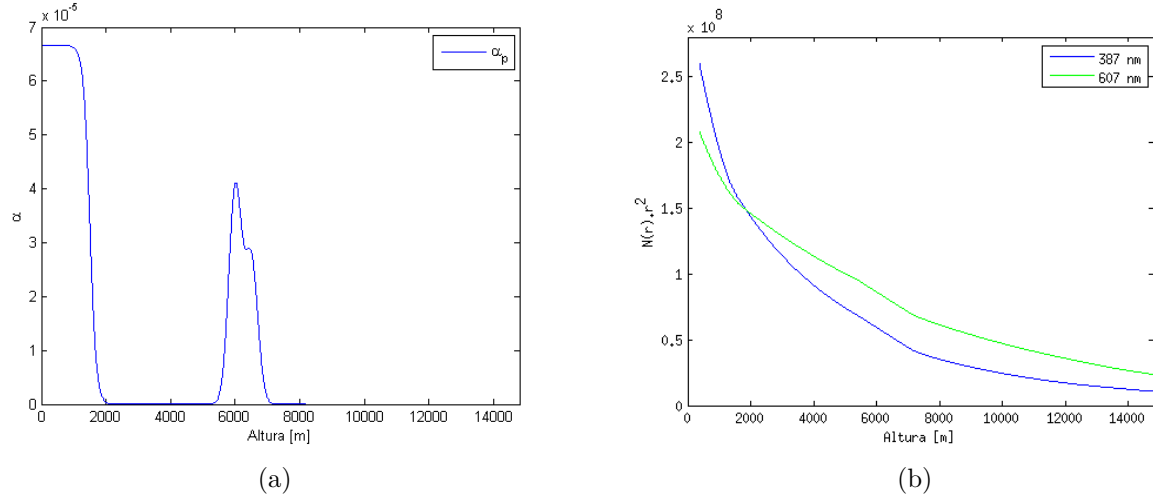


Figura 8.3.5: Simulación del coeficiente de extinción a 355 nm y de las señales Raman para 387 y 607 nm. Se observa en ambas figuras una pluma a los 6 km.

8.3.2.1. Propagación del error aleatorio de la señal lidar

El alto ruido aleatorio de las señales Raman impone que las mismas deban ser filtradas para su procesamiento, minimizando los problemas numéricos de la derivada del logaritmo que se observa en la ecuación 8.2.14. Para esto, se suele adquirir como altos tiempos de promediación (30 min a 1 hora), sumado a la aplicación de filtros espaciales de diferentes tipos. Debido a que el lidar de este trabajo es del tipo multiángulo, no es conveniente detenerse durante largos períodos de tiempo a un ángulo fijo, ya que es necesario la información atmosférica a diferentes ángulos y en una ventana de tiempo limitada. En las simulaciones del capítulo 3, se obtuvo que con 10 segundos de adquisición se logra la calidad de señal necesaria a lo largo de toda la tropósfera en una medición vertical. Sin embargo, los niveles de ruido aleatorio que se obtienen en las señales Raman son nocivos al momento de la inversión. El método de filtrado descrito en el capítulo 7 permite la inversión de estas señales sin los problemas numéricos planteados, pero de todas maneras, es necesario analizar la propagación del error remanente en las señales filtradas. Estos errores fueron mostrados en la figura 7.4.9 del mencionado capítulo.

Como se remarcó anteriormente, este tipo de inversión es utilizada en este trabajo para relevar los parámetros ópticos a ángulos distintos a la vertical, descartando los errores que puedan surgir debido a la inhomogeneidad de los aerosoles. Por lo tanto, de la misma manera que se analizó el error aleatorio del método TAM, se procede con el método Raman: se invierte el set de señales simuladas, y se calcula la dispersión en el set de salida. Para la simulación, se utiliza un ángulo cenital de 45° . Un esquema de procedimiento para el cálculo de la propagación del error aleatorio en los resultados de la inversión se observa en la figura 8.3.6.

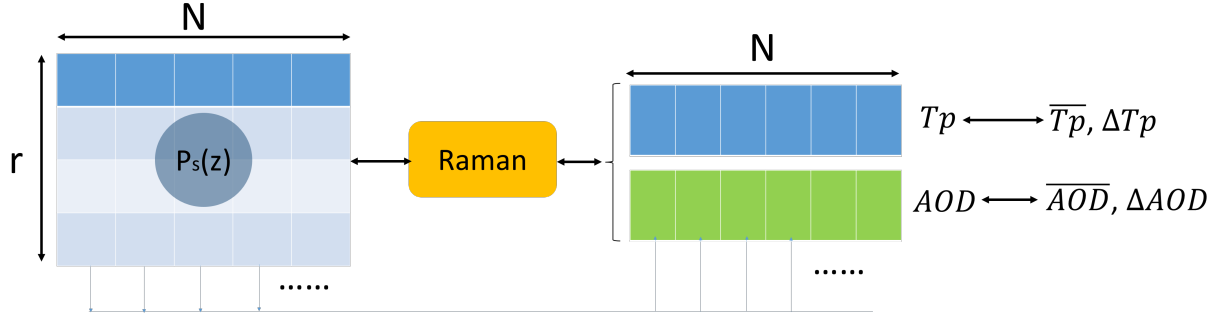


Figura 8.3.6: Secuencia esquemática del cálculo de los errores aleatorio del método Raman.

Los resultados de $\alpha^p(r)$ como resultado de la inversión de cada uno de los 10 perfiles simulados se observa en la figura 8.3.7, junto con su perfil original.

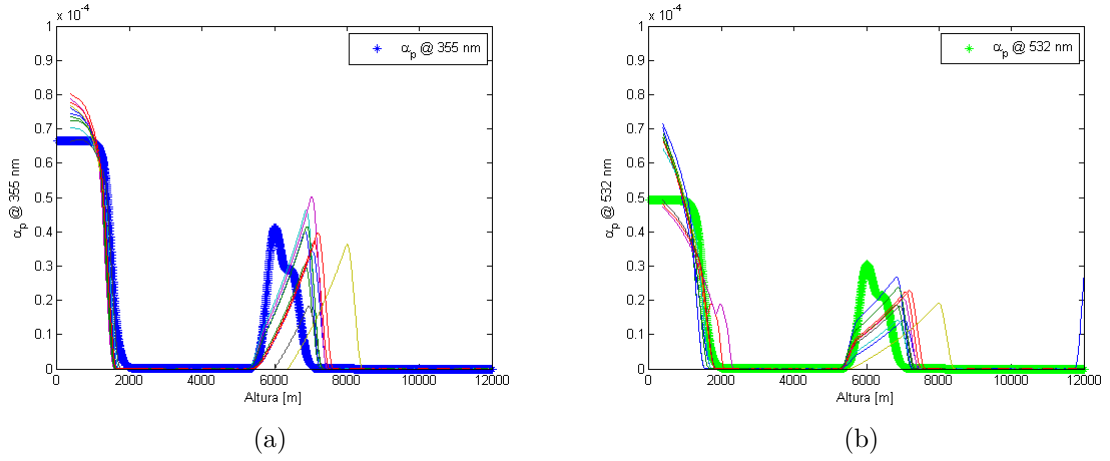


Figura 8.3.7: Perfiles del coeficiente de extinción para las longitudes de onda 355 y 532 nm. Se observan los perfiles originales junto con el set de resultados producto de la inversión de cada señal del set simulado.

Como se observa en la figura 8.3.7, los perfiles invertidos no se adaptan de manera exacta al perfil simulado, pero lo importante de este estudio es el valor de la integral a lo largo de la pluma.

Se observa en el cuadro 8.3.5 los valores de los errores aleatorios para la transmisión y el espesor óptico **de la pluma de aerosoles**. Esto es obtenido integrando los perfiles de la figura 8.3.7 en el rango de 4-10 km.

Errores aleatorios del método Raman en la transmisión de la pluma aerosólica		
	355 nm	532 nm
T_p^{real}	0,954	0,97
$\overline{T_p} \pm \Delta T_p^{real}$	$0,963 \pm 0,03$	$0,973 \pm 0,012$
$\frac{\Delta T_p^{real}}{T_p^{real}}$	2,284 %	1,23 %
Errores aleatorios del método Raman en el AOD de la pluma aerosólica		
	355 nm	532 nm
AOD^{real}	0,05	0,035
$\overline{AOD} \pm \Delta AOD^{real}$	$0,0370 \pm 0,022$	$0,0275 \pm 0,0122$
$\frac{\Delta AOD^{real}}{AOD^{real}}$	47,63 %	35,05 %

Cuadro 8.3.5: Errores aleatorios del método Raman para la transmisión y el espesor óptico aerosólico de la pluma simulada.

Se observa que los errores aleatorios de este método son superiores a los correspondientes al método TAM, debido al mayor ruido aleatorio que posee la señal lidar Raman. Además, estos errores son calculados en una pluma aerosólica ubicada a 6 km de altura (8,5 km de distancia desde el lidar), por lo que se espera que los errores sean mayores debido a la distancia con el lidar. De todas maneras, y gracias al filtrado realizado, se logran valores lo suficientemente bajos en el cálculo de la transmisión.

8.3.2.2. Errores sistemáticos asociados al método de inversión Raman

Estos errores están asociados a la incerteza del parámetro de entrada, el cual, es la constante de Ångström. Se descartarán los errores debido a la absorción del ozono, ya que es significativa para longitudes de onda menores a 300 nm [17]. Trabajando a 308 nm, la incerteza de $\alpha_p(r)$ es de aproximadamente 4 %, y para sistemas que trabajan a 350 nm o más, los errores sistemáticos totales de $\alpha^p(r)$ se encuentran en el rango de 5 - 10 % máximo por cada bin [16]. En [125], se reportan que para desviaciones en el valor de $\tilde{a}$ de 0,5 y 1 provocan un error relativo de 2 y 4 % respectivamente en el coeficiente de extinción. En [152] se reporta un error relativo del 6 y 8 % en $\alpha^p(r)$ para cambios en $\tilde{a}$ de 0 a 2. También, se descartan en esta tesis los errores debido a los perfiles de temperatura y presión, ya que son significativos en los casos donde se utilizan modelos que no se adapten a las condiciones particulares del día de la medición. La característica más importante de esta información es el gradiente de temperatura, el cual, los cambios de signo de esta variable afecta de manera significativa al cálculo de la concentración de $N_R(r)$ (ver ecuación 8.2.14). En casos en donde no existan este tipo de comportamientos, los errores pueden ser descartados [125].

Para caracterizar el error sistemático debido a la variación de $\tilde{a}$, se invierte una señal lidar Raman para un set de valores de $\tilde{a}$ comprendidos entre 0 y 2,5. Los perfiles resultantes de esta inversión junto con el valor real simulado se observan en la figura 8.3.8.

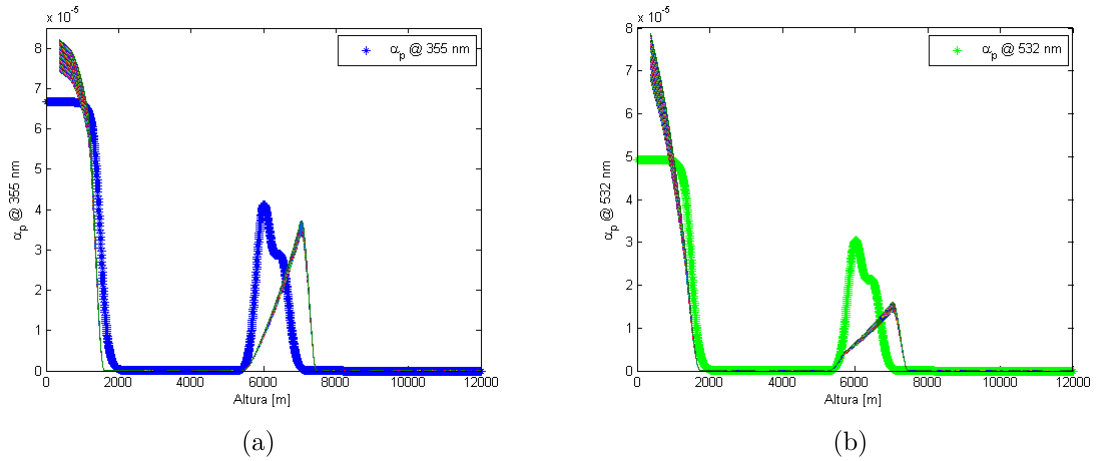


Figura 8.3.8: Perfiles del coeficiente de extinción para las longitudes de onda 355 y 532 nm . Se observan los perfiles originales junto con el set de resultados producto de la inversión del set de datos simulado.

En el siguiente cuadro (8.3.6) se muestran los errores en el cálculo de la extinción y transmisión aerosólica **de la pluma**. De la misma manera que en la sección anterior, se obtiene por medio de la integral del perfil de extinción $\alpha_p(r)$ en el entorno de la pluma.

Errores sistemáticos del método Raman en la transmisión de la pluma aerosólica		
	355 nm	532 nm
T_p^{real}	0,954	0,966
$\overline{T_p} \pm \Delta T_p^{real}$	$0,9650 \pm 0,0114$	$0,980 \pm 0,016$
$\frac{\Delta T_p^{real}}{T_p^{real}}$	1,2 %	1,6216 %

Errores sistemáticos del método Raman en el AOD de la pluma aerosólica		
	355 nm	532 nm
AOD^{real}	0,0471	0,0348
$\overline{AOD} \pm \Delta AOD^{real}$	$0,0354 \pm 0,0119$	$0,0189 \pm 0,0161$
$\frac{\Delta AOD^{real}}{AOD^{real}}$	25,203 %	46,2610 %

Cuadro 8.3.6: Errores sistemáticos del método Raman.

Los valores de $\hat{a}$ adoptados para este análisis son los correspondientes a los aerosoles atmosféricos: 0-2,5. Para reducir esta amplitud, se puede obtener su valor por medio de los valores de AOD calculados por el método TAM y la ecuación 2.3.3 del capítulo 2.

Aplicando al caso de estudio, se puede estimar el valor de $\hat{a}$ con la ecuacion citada, y junto con la propagación del error, obtener también su incerteza, dando como resultado: **0,61612 $\pm$ 0,4901**.

8.3.2.3. Errores totales del método de inversión Raman

Se observa en los cuadros 8.3.7 los errores totales cometidos en el método de inversión Raman.

Errores totales del método Raman en la transmisión de la pluma aerosólica		
	355 nm	532 nm
$\frac{\Delta T_p}{T_p}$	2,577 %	2,035 %
Errores totales del método Raman en el AOD de la pluma aerosólica		
	355 nm	532 nm
$\frac{\Delta AOD}{AOD}$	53,9 %	58,04 %

Cuadro 8.3.7: Errores totales del método de inversión Raman.

Por medio de este método, es posible obtener los perfiles de extinción $\alpha_p(r)$ como sus productos integrados (AOD y T_p) en cualquier ángulo cenital y sin la suposición de homogeneidad horizontal. La desventaja que presenta es que no se obtienen los parámetros ópticos desde el rango de 0 m. Sin embargo, son muy útiles para poder medir posibles inhomogeneidades aerosólicas o nubes por encima de la capa límite atmosférica.

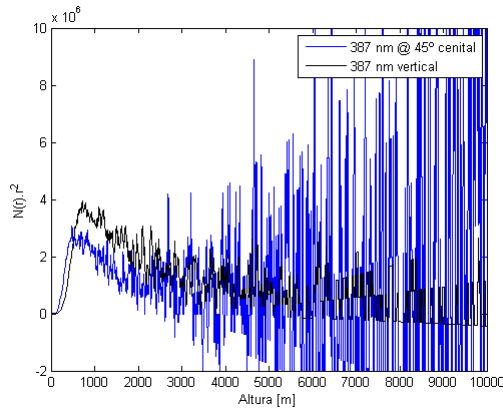
En caso de tratarse de medir plumas en rangos lejanos, será necesario la combinación de varios perfiles adquiridos (aumentando el tiempo de adquisición) para aumentar la calidad de la señal Raman por medio de la reducción de su ruido.

8.4. Procesamiento de las señales lidar adquiridas

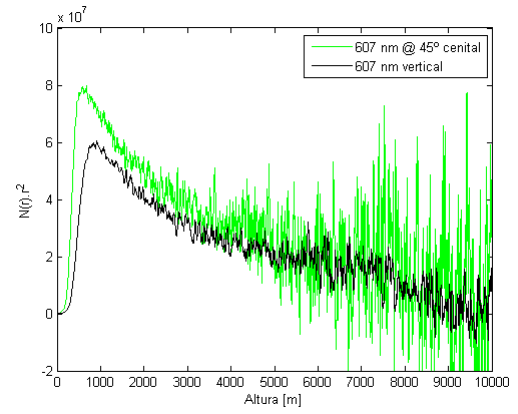
Se analiza en esta sección las señales adquiridas con el lidar Raman multiángulo, aplicando los métodos de inversión descritos en las secciones anteriores y haciendo principal énfasis en el rendimiento del sistema. Estas mediciones fueron realizadas en la División Lidar del CEILAP, en el predio de CITEDEF. Su ubicación en Villa Martelli, sobre la avenida General Paz, plantea un escenario muy bueno para el testeo de las señales y su inversión, ya que los valores de AOD típicos son comparables con los valores extremos para los Observatorios [21].

Se observa a continuación la inversión Raman del día 5/11/2015, en la cual se releva el espesor óptico de un cirrus entre los 8-10 km. Se observa en la figura 8.4.1 la acumulación de 40 perfiles de 10 s cada uno, logrando una señal equivalente a un tiempo apenas superior a los 6 minutos. Esto sigue siendo un tiempo muy bajo para una adquisición Raman típica, las cuales, no son menores de 30 minutos.

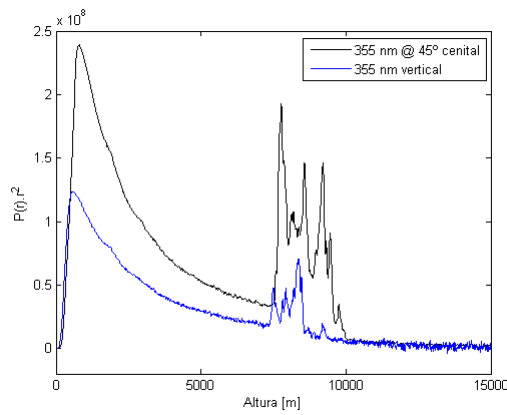
En los paneles inferiores de la figura 8.4.1 se muestran las señales elásticas corregidas en rango para 355 y 532 nm, tanto para la vertical como para 45° cenitales. Esto se realiza sólo con el objetivo de apreciar la ubicación y el espesor del cirrus del día analizado.



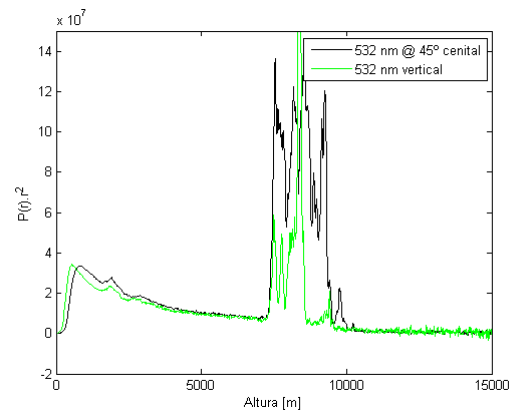
(a) 387 nm



(b) 607 nm



(c) 355 nm

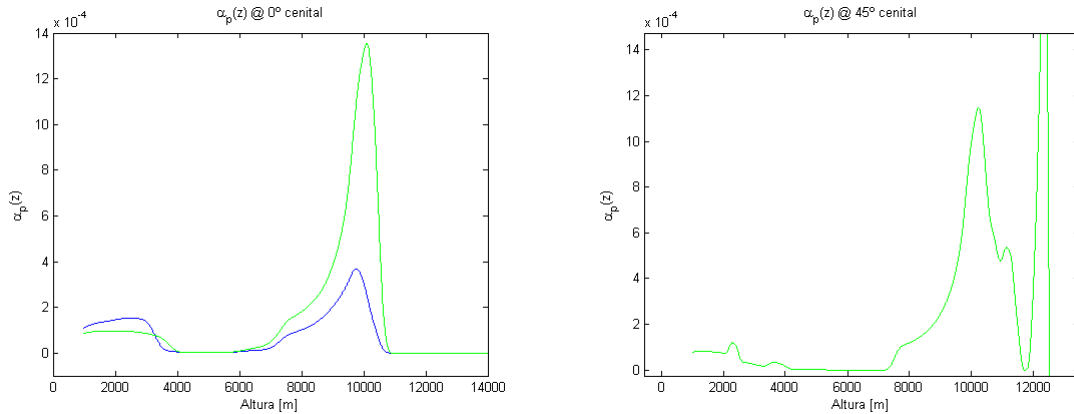


(d) 532 nm

Figura 8.4.1: Señales adquiridas el 5/11/2015. Paneles superiores (a y b): Raman; paneles inferiores (c y d): elásticas. Se muestran las señales adquiridas en la vertical y en ángulo de 45° cenitales, para un tiempo de adquisición de 6 min aproximadamente.

Se observa claramente en las señales elásticas la presencia de un cirrus entre los 8 y 10 *km*, pero no es tan clara su detección en las señales Raman sin su filtrado.

En la figura 8.2.3, se muestran los perfiles de $\alpha_p(z)$ resultantes de la inversión Raman para las señales Raman adquiridas el 5 de noviembre de 2015.



(a) Coeficientes de extinción para 355 y 532 *nm* obtenidos en la vertical. (b) Coeficiente de extinción para 532 *nm* obtenidos a un ángulo cenital de 45°.

Figura 8.4.2: Perfiles de extinción obtenidos de la inversión Raman para la vertical y en ángulo.

Debido a gran espesor del cirrus, las señales de 387 *nm* para la adquisición de 45° cenitales requieren de mayor tiempo de adquisición para poder medirlo. Esto es debido a que la medición en ángulo implica que el cirrus que se encuentra a los 8 *km* de altitud sea detectado a un rango desde el lidar de aproximadamente 11 *km*. De esta manera, al “ver” la nube más lejos, implica mayor atenuación de la radiación debido a un mayor camino óptico.

Es por esto que sólo se muestra la inversión del cirrus en 532 *nm*. Cabe recordar que en las simulaciones fueron tenidas en cuenta espesores ópticos de no mas de 0,2 para la inversión con tiempos estándar.

En cuanto al cálculo del AOD por medio del método TAM (sección 8.2.2), se desarrollan los resultados del día 4 de septiembre del 2015. Debido a que no hubo presencia de nubes, permite la comparación de los resultados de la inversión con los entregados por el fotómetro solar de la red Aeronet que posee el CEILAP.

Para el día analizado, se observa en la tabla 8.4.1 los AOD y transmisiones aerosólicas reportadas por el fotómetro.

Longitud de onda [<i>nm</i>]	AOD	T_p
380	0,192	0,825
440	0,164	0,849
500	0,136	0,873
675	0,097	0,908

Cuadro 8.4.1: Valores entregados por el fotómetro solar de la red Aeronet instalado en el CEILAP, para el día 4/9/2015.

Con los valores de la tabla 8.4.1, junto con el valor del coeficiente de Ångström (aportado también por la red Aeronet), se obtienen los valores espesor óptico y transmisión

aerosólica para las longitudes de onda del lidar. Estos valores se observan en la tabla 8.4.2.

Longitud de onda [nm]	AOD	T_p
355	0,19	0,82
532	0,13	0,88

Cuadro 8.4.2: Valores de AOD y transmisión aerosólica para las longitudes de onda del lidar, obtenidas de los datos del fotómetro solar de Aeronet.

Se muestra en las siguientes figuras las señales lidar elásticas sin filtrar, para una adquisición de 10 segundos cada una.

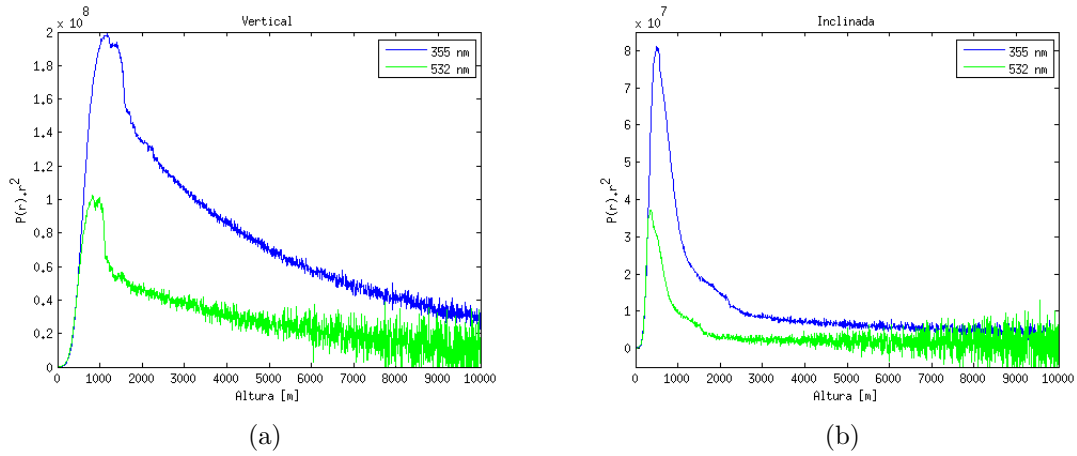


Figura 8.4.3: Señales elásticas adquiridas el 4 de septiembre de 2015, para las longitudes de onda de 355 y 532 nm, con 10 segundos de adquisición, tomadas en la vertical y a un ángulo de 45°.

Aplicando la inversión TAM descrita en la sección 8.2.2, se obtienen los resultados que se detallan en el cuadro 8.4.3.

Longitud de onda	AOD	$\frac{\Delta AOD}{AOD} [\%]$	T_p	$\frac{\Delta T_p}{T_p} [\%]$
355	0,18	9,346	0,84	1,833
532	0,12	9,345	0,88	1,21

Cuadro 8.4.3: Resultados de la inversión TAM para las señales del día 4 de septiembre de 2015.

Se observan en la tabla 8.4.3 resultados acorde a los esperados en base a los límites impuestos en el capítulo 1, donde el error relativo máximo aceptado para la transmisión de los aerosoles es del 3 %.

8.5. Conclusiones

En este capítulo se comenzó resumiendo los métodos de inversión factibles de ser utilizados en el lidar construido. Se enunciaron sus ecuaciones principales y se describieron

las características de cada método junto con las consideraciones a tener en cuenta para su utilización.

En base a la necesidad del parámetro aerosólico a calcular, se describieron los métodos utilizados para cada uno: TAM para la obtención del espesor óptico aerosólico de la capa límite atmosférica, y Raman para la obtención de perfiles de plumas en la media-alta tropósfera. Se analizó propagación de los errores aleatorios y sistemáticos de cada método propuesto, para confirmar el cumplimiento de las cotas de error impuestas.

Cómo parte del estudio del error aleatorio del método TAM, fue posible determinar el ángulo óptimo para la adquisición de la señal inclinada. Esto da la posibilidad de controlar el error aleatorio en este método, logrando bajos valores de error relativo en la transmisión de los aerosoles.

Se verificó el rendimiento de las señales adquiridas bajo diferentes condiciones. Las señales Raman fueron testeadas en la detección de un cirrus ubicado entre los 8-10 *km*. Esto pone a prueba la calidad de las señales detectadas por el lidar, el cual se encuentra en condiciones de relevar parámetros ópticos atmosféricos en toda la tropósfera, para bajos tiempos de adquisición y en condiciones extremas, como la detección de los parámetros ópticos de un cirrus.

Para el caso de las señales elásticas, se ha comprobado los valores que arroja la inversión con los resultado de fotómetro de Aeronet, el cual, es un instrumento de referencia a nivel mundial para la calibración de los resultados de los lidares.

Capítulo 9

Trabajo futuro

En base al trabajo realizado, se plantean a continuación las actualizaciones del sistema a mediano y largo plazo, tanto en el *hardware* y la electrónica. También se plantean proyectos en el campo del análisis de datos, producto de nuevas necesidades en la determinación de parámetros atmosféricos. Este último punto es motivado por nuevos proyectos a los que esta enmarcado la División Lidar, y en los cuales formo parte del equipo de trabajo. Finalmente, se describen las tareas a corto-mediano plazo en cuanto al traslado del sistema lidar al Observatorio Pierre Auger.

El lidar Raman multiángulo desarrollado en esta tesis, no sólo posee grandes potencialidades, si no también una fácil capacidad de ampliación debido al diseño modular de su *software* y de su *hardware*. Se lista a continuación los trabajos futuros planeados para este sistema.

■ Electrónica

Actualizar el microcontrolador para el control del lidar. El módulo RCM 2200 utilizado cumple con todas las características necesarias para este trabajo, pero se encuentra limitado en cuanto a sus perspectivas de futuras expansiones, como la facilidad de actualización de su *firmware* y la interconexión a nuevos dispositivos con otro tipo de interface. Se prevee la migración a módulos del tipo mini-PC, como el Raspberry PI (<http://www.raspberrypi.org/>). Para esta implementación, no es necesario modificar el resto de la electrónica de control ya construida, sólo se deberá adaptar el conexionado entre el nuevo módulo con la electrónica realizada.

■ Mecánica

Para un mejor conocimiento de la alineación de cada telescopio, es conveniente tener acceso a la señal lidar generada por cada uno de ellos por separado, pudiendo caracterizar el *overlap* de cada uno. Para esto se planea instalar *shutters* mecánicos adelante de cada fibra óptica, sujetos sobre los brazos de los telescopios. El control de los mismos podrá hacerse sin problemas por medio de la interfaz de control de las señales de salida (capítulo 4, Sección 4.3.3.4), la cual se poseen 9 disponibles (y con capacidad de expansión).

■ Software/firmware

Si bien el *software* de este trabajo se encuentra funcionando en todas sus capacidades, existen actualizaciones en cuanto a aumentar la implementación de nuevas automatizaciones. Esto es poder realizar configuraciones del sistema de manera más dinámica, mediante archivos de configuración externos al código, pudiendo realizar cambios sin la necesidad de recompilar el código. En cuanto al *firmware*, se planea la implementación de informes de fallos por medio de envío de correos electrónicos al encargado del equipo.

■ Análisis de datos

En el último tiempo ha tomado gran fuerza en la comunidad lidarista la inversión de las señales para el relevo de los **perfiles de concentración** de las partículas de aerosoles. Esto ha sido promovido debido a los eventos de erupciones volcánicas y su efecto sobre la aeronavegación. La División Lidar del CEILAP ha creado un grupo de trabajo en este tema, el cual formo parte. Los trabajos realizados hasta el momento es sobre uno de los algoritmos que se encuentran disponibles: LIRIC [153] (*Lidar Radiometer Inversion Code*), el cual hace uso de la sinergia entre los datos

aportados de un lidar y el fotómetro de la red Aeronet. Existen al día de hoy otros métodos de inversión de este tipo, como el GARRLiC [154] (Generalized Aerosol Retrieval from Radiometer and Lidar Combined Data), pero no existe un consenso mundial acerca de la utilización de uno en particular.

En cuanto a los pasos a seguir con respecto a las colaboraciones internacionales, cabe remarcar que el sistema construido se enviará al Observatorio Pierre Auger. Para esto se ha realizado un informe que será presentado en el próximo *meeting* a realizarse a finales del mes de junio de 2016 en Karlsruhe, Alemania. Una vez aprobado, el traslado del mismo se realizará con fondos del proyecto presentado y aprobado al MinCyT denominado “**Auger Muons and Infill for the Ground Array (AMIGA) y Upgrade de Auger**”. El mismo contempla la incorporación del lidar multiángulo de este trabajo, el cual, tendrá un alto impacto sobre los eventos híbridos registrados y en particular, en aquellos registrados por AMIGA. Para maximizar la sinergia de datos, se propondrá la instalación del mismo en el sitio Coihueco, debido a la cercanía con el *array* de dicho proyecto.

La instalación del lidar en el Observatorio Pierre Auger impone un desafío muy grande a la División Lidar, no sólo en lo referido al traslado e instalación del sistema, si no también en cuanto al análisis de datos y la interacción con una comunidad internacional de gran experiencia.

Capítulo 10

Conclusiones

El trabajo realizado en esta tesis tuvo como objetivo fundamental la simulación, diseño, construcción, y análisis de datos de un lidar Raman multiángulo, con el fin de caracterizar la atmósfera en los Observatorios Pierre Auger y Cherenkov Telescope Array. Se realizaron trabajos en los campos de mecánica, óptica, electrónica y desarrollo de *software*, llevando a cabo una gran tarea interdisciplinaria para la concreción de los mismos. Todo esto ha permitido innovar en los procedimientos de construcción de lidars de la División Lidar, logrando un sistema de características único en Latinoamérica. Como miembro de esa División, tuve la oportunidad de ser parte activa en el desarrollo de estas capacidades, las cuales han dejado una experiencia muy grande, así como también nuevos métodos de trabajo, que han permitido avances en todas las áreas mencionadas, desde la simulación de sus parámetros hasta el diseño y construcción. Toda esta tarea fue realizada en base a los requerimientos impuestos por los Observatorios Pierre Auger y CTA, cumpliendo con las características solicitadas.

En el capítulo 1 se comienza con la descripción de las características generales de los Observatorios en los que se enmarca este trabajo, haciendo hincapié en las necesidades del estudio de la atmósfera. En cuanto a los resultados que debe entregar el lidar, se plantearon las cotas de error relativo máximo a obtener en el cálculo de la transmisión de los aerosoles, las cuales son impuestas por dichos Observatorios. Estos datos fueron utilizados en el análisis de los métodos de inversión, pudiendo determinarse el más conveniente. Toda esta información permitió la enunciación de las características generales del *hardware* y *software* del lidar, quedando así establecidas las bases para el diseño y construcción de cada etapa del desarrollo del sistema.

A modo de descripción del medio a censar, en el capítulo 2 se introducen los parámetros ópticos de los aerosoles a estudiar. Se describen así los tipos de interacción radiación-materia necesarios para el estudio de este instrumento (elásticas: Rayleigh y Mie e inelástica: Raman), como también parámetros ópticos útiles para el estudio del lidar (ley de Ångström, relación lidar). También se describen las diferentes redes de medición disponibles.

El proceso de diseño del lidar (capítulo 3) comenzó con la simulación de la respuesta del *hardware* en base a especificaciones generales y particulares, simulando la atmósfera bajo condiciones de cargas aerosólicas adversas. Esto permitió obtener características relevantes del sistema, como el área total de colección óptica del lidar y el tiempo mínimo de adquisición que permitan asegurarse niveles correctos de las señales detectadas. Estas condiciones fueron impuestas a la relación S/R de la señal Raman de nitrógeno de 387 nm. (Se impone una relación $S/R > 1$ a lo largo de toda la tropósfera).

Se planificaron las etapas de diseño y construcción para desarrollar la mayor parte de los componentes en el país, adquiriéndose sólo en el exterior la mínima cantidad (capítulo 4). Con ese fin, se trabajó en colaboración con grupos de diferentes disciplinas dentro y fuera de CITEDEF, pudiéndose lograr un *hardware* robusto que opere en las condiciones climáticas más adversas que se pudieran presentar en el lugar de emplazamiento.

En cuanto a la electrónica de control, se realizó un diseño genérico y modular, de fácil adaptación a otros sistemas que requieran este tipo de operación. La misma está basada en un microcontrolador que administra los comandos de control necesarios para la operación del sistema, desde la operación manual de cada componente hasta la automatización de procesos. Toda la electrónica ha sido diseñada y construida en el CEILAP, lográndose un control simple y con capacidad de ampliación ante eventuales cambios.

El *software* realizado fue también pensado bajo el concepto de modularidad, lo que le da al sistema capacidades de expansión y adaptación a otros lidars que posee la División

Lidar (capítulo 5). Se desarrolló un diseño de interfaz gráfica simple, que permite un procedimiento sencillo en la toma de datos a operadores con pocos conocimientos de la técnica lidar. El alto grado de automatización de sus procesos, como en la coordinación del encendido y apagado de sus elementos, cumplen con las medidas de seguridad necesarias tanto para los operadores que se puedan encontrar en el lidar, como para los equipos. Con este propósito, se ha desarrollado un protocolo de comunicación (apéndice B) entre los diferentes procesos, como también con el microcontrolador. Estos comandos permiten la sincronización para el correcto funcionamiento de los diferentes procedimientos en la toma de datos.

En el capítulo 6 se describe el desarrollo de un *hardware-software* para la auto-alineación de los telescopios, constituyendo un paso muy significativo que permite la operación de estos equipos de manera desatendida, o que requieran del operador atento a otras tareas relacionadas con la toma de datos. Para la concreción de este trabajo ha sido necesario un análisis minucioso del factor de *overlap* del sistema, por lo cual se realizó un *software* capaz de calcularlo para cualquier lidar (apéndice A). Gracias a este programa, se ha podido realizar este análisis definiéndose así los parámetros óptimos para el proceso de auto-alineación.

Los algoritmos para el análisis de los datos aportan también un gran avance sobre la forma tradicional de procesamiento de señales, ya que se han automatizando procedimientos que hasta el momento se realizaban de manera manual (capítulo 7). Se ha desarrollado un método de filtrado de las señales lidar que permite la disminución del ruido aleatorio, facilitando el procesamiento de las señales, principalmente las Raman. Este mismo pre-procesamiento permite además la detección automática de zonas moleculares, importante para la elección del punto de referencia en los métodos de inversión, como la obtención de la altura de la capa límite.

En cuanto al procesamiento de las señales, se han analizado los diferentes tipos de inversión utilizados, para poder aplicar el método más adecuado en cada caso (capítulo 8). Esto nos permite cumplir con la condición de no superar el error relativo máximo impuesto en el resultado de la transmisión aerosólica. Queda demostrado que el método TAM es el ideal para el cálculo de la transmisión aerosólica en la capa límite atmosférica. Adquiriendo perfiles verticales y a ángulos cenitales de 45° se logra, por medio de un simple cálculo, obtener la transmisión de las partículas.

Para casos particulares en los que se desee perfiles de extinción, se utilizarán las señales Raman, las cuales permiten ser invertidas a lo largo de gran parte de la tropósfera con bajos tiempos de adquisición, pudiéndose así relevar posibles plumas de aerosoles en la media-alta tropósfera.

El sistema lidar Raman multiángulo aquí desarrollado cumple con las especificaciones técnicas que fueron establecidas por los Observatorios Pierre Auger y CTA. Esto lo hace apto para ser utilizado en los mismos con el fin de determinar las características ópticas de los aerosoles. Se han incorporado nuevas técnicas para la construcción de lidares, como también, nuevos procedimientos en el análisis y procesamiento de sus datos. También nuevos métodos de filtrado que permiten una gran reducción del ruido aleatorio en las señales adquiridas, como también la obtención del punto de referencia molecular y la altura de la capa límite, produciendo así soluciones originales para varios de los problemas que se plantearon. Con todo ello, se ha obtenido un sistema lidar con un alto grado de automatización tanto para su operación como para el procesamiento de sus datos. Todo esto deja un trabajo futuro muy activo dentro de las colaboraciones internacionales de los Observatorios, como nuevos métodos de trabajo dentro de la División Lidar.

Bibliografía

- [1] www.auger.org.
- [2] Carlos Rosito. Fernando Congedutti, Gian Paolo Gobbi y Alberto Adriani. Eduardo Quel. Sobre la instalacion de un lidar monoestatico en el complejo astronomico el leoncito, san juan, argentina. *IV Encuentro Latinoamericano sobre Optica, Láseres y Aplicaciones y III Escuela y Taller Internacionales en FOTONICA, Oaxtepec, México, 21 de Junio al 2 de Julio de 1993*.
- [3] S. Fraga, M. B. Lavorato, E. J. Quel, and C. A. Rosito. Caracterización teórica y experimental del ruido en ausencia de señal en el sistema de detección de un lidar. *Anales AFA (Asociacion Fisica Argentina)*, 5:203–207, 1994.
- [4] M B Lavorato, J. C. Dworniczak, G. Fochesatto, L. de Pablo Pardo, M. Pagura, A. Peuriot, E. Quel, C. Rosito, G. Santiago, and O. Vilar. Lidar de nd:yag para medición de para metros atmosfericos. *Anales AFA (Asociacion Fisica Argentina)*, *Villa Giardino, Cordoba*, 6(1), 1995.
- [5] G. Fochesatto, M. Lavorato, C. Rosito, E. Quel, and A. Giraldez. Medición de capa límite atmosférica mediante un lidar. *Anales AFA (Asociacion Fisica Argentina)*, *San Carlos de Bariloche, Río Negro.*, 7(1), 1996.
- [6] P. Cesarano E. Quel P. Flamant J. Pelon J. Fochesatto, M. Lavorato. Métodos de estudio de capa límite atmosférica (cla) mediante un lidar de retrodifusión. *Anales AFA (Asociacion Fisica Argentina)*, *Tandil, Buenos Aires.*, 8(1), 1997.
- [7] J. Fochesatto, M. Lavorato, J. C. Dworniczak, P. Cesarano, E. Quel, P. Flamant, and J. Pelon. Sistema lidar para la medición simultánea de parámetros atmosféricos en la tropósfera. *Anales AFA (Asociacion Fisica Argentina)*, *San Luis*, 1998.
- [8] J. Fochesatto, M. Lavorato, J. C. Dworniczak, P. Cesarano, E. Quel, P. Flamant, and J. Pelon. Determinacion del coeficiente de extincion en cirrus diurnos y nocturnos por medio de un lidar de retrodifusion. *Anales AFA (Asociacion Fisica Argentina)*, *San L*, 9(1), 1998.
- [9] M. Lavorato, J. Fochesatto, P. Cesarano, E. Quel, P. Flamant, and J. Pelon. Large antropogenic burning events at meso-scale and cirrus as observed by lidar in southern hemisphere at buenos aires argentina. *19 International Laser Radar Conference (ILRC)*, 1998.
- [10] Otero Lidia, Lazarte Dardo, Ristori Pablo, Wolfram Elian, Fochesatto Javier, Salvador Jacobo, Raponi Marcelo, Delia Raul, Vilar Osvaldo, Dworniczak, Flamant Pierre, and Quel Eduardo. Primeras mediciones con un sistema lidar multilongitud de onda en el ceilap. *Anales AFA (Asociacion Fisica Argentina)*, 15:336–338, 2004.

- [11] A. Pazmiño, M. Lavorato, G. Fochesatto, P. Ristori, P. Cesarano, M. Castellón, E. Quel, S. Godin, and G. Mégie. Dial system for measurements of stratospheric ozone at buenos aires. *20 th ILRC (International Laser Radar Conference)*, Vichy, Francia, 2000.
- [12] E. Wolfram, Pazmiño, Otero A., Salvador L., Piacentini J., Porteneuve R., Godin-Beekmann J., S., and E. Quel. Stratospheric ozone lidar mobile system at buenos aires, argentina. *Reviewed and Revised Papers Presented at the 22nd International Laser Radar Conference (ILRC 2004)*, II:589–592, 2004.
- [13] E. Wolfram, J. Salvador, L. Otero, A. Pazmiño, J. Porteneuve, S. Godin-Beeckmann, H. Nakane, and E. Quel. Solar campaign: stratospheric ozone lidar of argentina. *Proc. SPIE 5887, Lidar Remote Sensing for Environmental Monitoring VI*, 2005.
- [14] P. Ristori, G. Fochesatto, L. Otero, and E. Quel. Modelling of the lidar signal returns applied to the development of a high repetition system to retrieve real time atmospheric extinction at pierre auger observatory. 2005.
- [15] Clement Mallet and Frédéric Bretar. Full waveform topographic lidar: State of the art. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64:1–16, 2009.
- [16] V. A. Kovalev and W. E. Eichinger. *Elastic Lidar. Theory, Pactice and Analysis Methods*. Publicado por John Wiley y Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. ISBN 0-471-20171-5.
- [17] Claus Weitkamp. *LIDAR: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere*. Springer, 2005.
- [18] Robert T. Menzies and R.M. Hardesty. Coherent doppler lidar for measurements of wind fields. *Proceedings of the IEEE*, 77(3):449–462, 1989.
- [19] Pawelko Ezequiel, Pallotta Juan, Otero Lidia, Wolfram Elian, Delia Raul, Salvador Jacobo, Raponi Marcelo, Martorella Evangelina, Vilar Osvaldo, Gonzalez Francisco, Dworniczak, and Quel Eduardo. Medicion de cenizas del volcanien chaiten en buenos aires. *Anales AFA (Asociacion Fisica Argentina)*, 20:255 – 259, 2009.
- [20] Pablo R. Ristori, Lidia A. Otero, Juan V. Pallotta, Ezequiel E. Pawelko, and Eduardo J. Quel. Biomass burning and volcanic ash characterization at centro de investigaciones en láseres y aplicaciones, buenos aires, argentina. *Revista Boliviana de Física*, 21(21):30–32, 2012.
- [21] Lidia Ana Otero. *Estudio de las propiedades ópticas de aerosoles en Argentina con técnicas de sensado pasivo y activo de la atmósfera*. PhD thesis, Facultad de Ingenieria de la Universidad de Buenos Aires, 2007.
- [22] D. N. Whiteman. Application of statistical methods to the determination of slope in lidar data. *Appl. Opt.*, 38:3360–3369, 1999.
- [23] G. Sequerios. *Lidar Technique for Atmospheric Monitoring in the Pierre Auger Observatory*. PhD thesis, Universita degli Studi di Torino, 2006.
- [24] Hamamatsu. Photon counting using photomultiplier tubes. Technical report, Hamamatsu Photonics, Mayo 1998.

- [25] Hamamatsu. Photomultiplier tubes. basics and applications. Technical report, Hamamatsu Photonics, 2006.
- [26] J. Abraham et al [Pierre Auger Collaboration]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors, and Associated Equipment*, pages 50–59, 2004.
- [27] [The Pierre Auger Collaboration], Quel Eduardo, Otero Lidia, Etchegoyen Alberto, and Pallotta Juan et al. Atmospheric effects on extensive air showers observed with the surface detector of the pierre auger observatory. *Astropart. Phys.* 32, 89. *arXiv:0906.5497v2*, 2009.
- [28] [The Pierre Auger Collaboration], Quel Eduardo, Otero Lidia, Etchegoyen Alberto, and Pallotta Juan et al. Observation of the suppression of the flux of cosmic rays above 4×10^{19} ev. *Astropart. Phys.* 32, 89. *arXiv:0906.5497v2*, 2009.
- [29] [The Pierre Auger Collaboration], Quel Eduardo, Otero Lidia, Etchegoyen Alberto, and Pallotta Juan et al. Upper limit on the diffuse flux of ultrahigh energy tau neutrinos from the pierre auger observatory. *PHYSICAL REVIEW LETTERS*, 100(21):1 – 14, 2008.
- [30] [The Pierre Auger Collaboration], Quel Eduardo, Otero Lidia, Etchegoyen Alberto, and Pallotta Juan et al. Correlation of the highest-energy, cosmic rays with nearby, extragalactic objects. *Revista SCIENCE, VOL.318, PP.938-943, ISSN 0036-8075*, 2007.
- [31] Ing. Oscar Wainberg. *Electrónica y Procesamiento de Señales de Detectores de Muones del Observatorio Pierre Auger*. PhD thesis, Universidad Tecnológica Nacional, Regional Buenos Aires, 2014.
- [32] B. S. Acharya et al. [CTA Colaboration]. Seeing the high-energy universe with the cherenkov telescope array - the science explored with the cta. *Astroparticle Physics*, 43:3–18, 2013.
- [33] <https://magic.mpp.mpg.de/>.
- [34] <http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/>.
- [35] <http://veritas.sao.arizona.edu/>.
- [36] Colaboración CTA.
- [37] Cherenkov Telescope Array.
- [38] Konrad Bernlohr. Simulation of imaging atmospheric cherenkov telescopes with corsika and simtelarray. *Astroparticle Physics*, 30:149–158, 2008.
- [39] Colombo E. Astrofísica de altas energías con los telescopios magic. In *Presentacion oral en la segunda reunión conjunta SUF-AFA. 20-23 de septiembre, Montevideo, Uruguay.*, 2011.
- [40] Karim Louedec. Atmospheric effects in astroparticle physics experiments and the challenge of ever greater precision in measurements. *Astroparticle Physics*, 60:54–71, 2015.

- [41] Karim Louedec for the Pierre Auger Collaboration and Remi Losno. Atmospheric aerosols at the pierre auger observatory and environmental implications. *arXiv:1208.6275v1*, 2012.
- [42] S.Y. BenZvi, R. Cester, M. Chiosso, B.M. Connolly, A. Filipcic, B. Garcia, A. Grillo, F. Guarino, M. Horvat, M. Iarlori, C. Macolino, J.A.J. Matthews, D. Melo, R. Mussa, M. Mostafá, J. Pallota, S. Petrera, M. Prouza, V. Rizi, M. Roberts, J.R. Rodriguez Rojo, F. Salamida, M. Santander, G. Sequeiros, A. Tonachini, L. Valore, D. Veberic, S. Westerhoff, D. Zavrtanik, and M. Zavrtanik. The lidar system of the pierre auger observatory. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 574(1):171 – 184, 2007.
- [43] A. Filipcic, M. Horvat, D. Veberic, D. Zavrtanik, and M. Zavrtanik. Scanning lidar based atmospheric monitoring for fluorescence detectors of cosmic showers. *Nota interna del Observatorio Pierre Auger, GAP-2003-001*.
- [44] Fernando Arqueros, Joerg R. Hoerandel, and Bianca Keilhauer. Air fluorescence relevant for cosmic-ray detection - summary of the 5th fluorescence workshop, el escorial 2007. *Nucl.Instrum.Meth.A597:.*, pages 1–22, 2008.
- [45] Roger Clay Bruce Dawson for the HiRes Collaboration Georgianna Martin, John A.J. Matthews. Time variation of the vertical profile of the atmosphere for air fluorescence measurements. *Proceedings del ICRC (Intenational Cosmic Rays Conference)*, 1999.
- [46] John A.J. Matthews, Roger Clay, and for the the Pierre Auger Observatory Collaboration. Atmospheric monitoring for the auger fluorescence detector. *Proceedings of ICRC 2001*, 2001.
- [47] The Pierre Auger Collaboration. A study of the effect of molecular and aerosol conditions in the atmosphere on air fluorescence measurements at the pierre auger observatory. *Astroparticle Physics*, 33:108–129, 2010.
- [48] The Pierre Auger Collaboration. Techniques for measuring aerosol attenuation using the central laser facility at the pierre auger observatory. *JINST*, 8, 2013.
- [49] R. M. Measures. *Laser Remote Sensing*. John Wiley & Sons, Inc. New York, 1984.
- [50] NASA. Nasa earth fact sheet: <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html>.
- [51] Shifrin K. Simple relationships for the Ångström parameter of disperse systems. *Applied Optics*, 34:4480–4485, 1995.
- [52] Juan Luis Guerrero Rascado. *Técnica lidar para la caracterización atmosférica mediante dispersión elástica y Raman*. PhD thesis, Universidad de Granada, 2008.
- [53] P. Warneck. *Chemistry of the natural atmosphere*. Wiley and Sons, 1988.
- [54] Shine Haywood, J. M. y K. P. Multi-spectral calculations of the direct radiative forcing of tropospheric sulphate and soot aerosols using a column model. *Q. J. Royal. Meteor. Soc*, 123 (543):1907–1930, 1997.

- [55] P. V. Forster, P. Ramaswamy, T. Artaxo, R. Bernsten, D. W. Betts, J. Fahey, J. Haywood, D.C. Lean, G. Lowe, J. Myhre, R. Nganga, G. Prinn, M. Raga, Schulz, and R. Van Dorland. *Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.
- [56] Y. J. Kaufman, I. Koren, L. A. Remer, D. Rosenfeld, and Y. Rudich, editors. *The effect of smoke, dust, and pollution aerosol on shallow cloud development over the Atlantic Ocean*, volume 102 (32). Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2005.
- [57] F. M. M. Morel and N. M. Price. The biogeochemical cycles of trace metals in the oceans. *Science*, 300, 2003.
- [58] Intergovernmental Panel for Climate Change. <http://www.ipcc.ch/>.
- [59] B. N. Holben, T. F. Eck, I. Slutsker, D. Tanre, J. P. Buis, A. Setzer, E. Vermote, J. A. Reagan, Y. J. Kaufman, T. Nakajima, F. Lavenue, I. Jankowiak, and A. Smirnov. Aeronet- a federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sens. Environ*, 66:1–16, 1998.
- [60] Bösenberg J., A. Ansmann, J. M. Baldasano, D. Balis, C. Böckmann, B. Calpini, A. Chaikovskiy, P. Flamant, A. Hagard, V. Mitev, A. Papayannis, J. Pelon, D. Resendes, J. Schneider, N. Spinelli, T. Trickl, G. Vaughan, G. Visconti, and M. Wiegner. Earlinet: a european aerosol research lidar network, laser remote sensing of the atmosphere. *Selected Papers of the 20th International Laser Radar Conference, 2001. Edition Ecole Polytechnique, Palaiseau, France*, pages 155–158, 2001.
- [61] E. J. Welton, J. R. Campbell, J.D. Spinhirne, and V.S. Scott. Global monitoring of clouds and aerosols using a network of micro-pulse lidar systems. *SPIE, Bellingham, WA: Lidar Remote Sensing for Industry and Environmental Monitoring*, pages 151–158, 2001.
- [62] Murayama T., N. Sugimoto, I. Uno, K. Kinoshita, K. Aoki, N. Hagiwara, Z. Liu, I. Matsui, T. Sakai, T. Shibata, K. Arao, B. Sohn, J. Won, S. Yoon, T. Li, J. Zhou, H. Hu, M. Abo, K. Iokibe, R. Koga, and Y. Iwasaka. Ground-based network observation of asian dust events of april 1998 in east asia. *J. Geophys. Res.*, , 106:18345–18360, 2001.
- [63] R. M. Hoff and K. J. McCann. A regional east atmospheric lidar mesonet (realm). *Eos Trans. Amer. Geophys. Union*, 83, (Fall Meeting Suppl. A22C0147), 2002.
- [64] Guerrero Rascado J., Landulfo E., Antuna J. C., Barbosa J., Barja B., Bastidas A., Bedoya E., Da Costa R., Estevan R., Forno R., Gouveia D., Jimenez C., Nisperuza D., Otero L., Pallotta J., Papandrea Sebastian, Pawelko E., Ristori P., Quel E., Rodrigues F., Salvador J., Sanchez F., and Silva A. Towards an instrumental harmonization in the framework of lalinet: dataset of technical specifications. *Proceedings SPIE, Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing X*, 9246, 2014.

- [65] Otero L., Ristori P., Fochesatto J., Flamant P., Wolfram E., Quel E., Piacentini R., Holben B., and McClain. Aerosoles atmosféricos medidos en diferentes lugares de la argentina con la red aeronet / nasa. *Anales AFA (Asociacion Fisica Argentina)*, 13:280–284, 2002.
- [66] Otero L., Ristori P., Pallotta J., Pawelko E., Delia R., and Quel E. Análisis de 12 años de medición de un fotómetro solar instalado en falda del carmen, provincia de córdoba. *Anales AFA (Asociacion Fisica Argentina)*, 1:56–59, 2013.
- [67] Otero L., Ristori P., Holben B., and Quel E. Aerosol optical properties by means of a sunphotometer and lidar system in buenos aires argentina. *Optica Pura y Aplicada*, 39:43–47, 2006.
- [68] A.. Ångström. On the atmospheric transmission of sun radiation and on dust in the air. *Geogr. Ann. Dtsch.*, 12:156–166, 1929.
- [69] D. A. Hegg, R. J. Ferek, and P. V. Hobbs. Aerosol size distribution in the cloudy atmospheric boundary layer of the north atlantic ocean. *J. Geophys. Res.*, 98:8841–8846, 1993.
- [70] M. Hess, P. Koepke, and I. Schult. Optical properties of aerosols and clouds: The software package opac. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79 (5):831–844, 1998.
- [71] K. T. Whitby. The physical characteristics of sulfur aerosol. *Atmos. Env.*, 12:135–159, 1978.
- [72] J. Y. Kaufman and R. S. Fraser. Light extinction by aerosols during summer air pollution. *J. Climate Appl. Meteor.*, 22:1694–1706, 1983.
- [73] G. Yamamoto and Tanaka M. Determination of aerosol size distribution from spectral attenuation measurements. *Applied Optics*, 8:447–453, 1969.
- [74] M. D. King, D. M. Byrne, B. M. Herman, and J. A.. Reagan. Aerosol size distributions obtained by inversion of spectral optical depth measurements. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 35:2153–2167, 1978.
- [75] O. Dubovik and M. King. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from sun and sky radiance measurements. *J. Geophys. Res.*, 105 (D16):20673–20696, 2000.
- [76] O. Dubovik, A. Smirnov, B. N. Holben, M. D. King, Y.J. Kaufman, T. F. Eck, and I. Slutsker. Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from aeronet sun and sky - radiance measurements. *J. Geophys. Res.*, 105 (D8):9791–9806, 2000.
- [77] B. N. Holben, D. Tanre, A. Smirnov, T. F. Eck, I. Slutsker, N. Abuhassan, W. W. Newcomb, J. Schafer, B. Chatenet, F. Lavenue, Y. J. Kaufman, J. Vande Castle, A. Setzer, B. Markham, D. Clark, R. Frouin, R. Halthore, A. Karnieli, N. T. O’Neill, C. Pietras, R. T. Pinker, K. Voss, and G. Zibordi. An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol optical depth from aeronet. *J. Geophys. Res.*, 106, 2001.

- [78] T. F. Eck, N. Holben B, J.S. Reud, O. Dubovik, A. Siminov, N. T. O'Neill, I. Slutsker, and S. Kinne. Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban and desert dust aerosols. *J. Geophys. Res.*, 104 (D24):31333–31349, 1999.
- [79] G. A. D'Almeida, P. Koepke, and E.P. Shettle. *Atmospheric aerosols: Global climatology and radiative characteristics*. 1991.
- [80] O. Dubovik, B. N. Holben, T. F. Eck, A. Smirnov, Y. J. Kaufman, M. D. King, D. Tanre, and I. Slutsker. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations. *J. Atm. Sci.*, 59:590–608, 2002.
- [81] H. C. Van de Hulst. *Light Scattering by Small Particles*. John Wiley and Sons, Inc., New York, 470., 1957.
- [82] E. J. McCartney. *Optics of Atmosphere. Scattering by Molecules and Particles*. John Wiley and Sons, Inc., New York., 1977.
- [83] Simon A. Carn. Scattering. *Presentacion oral en GE4250 - Fundamentals of Remote Sensing, abril 2013. Michigan Tech - Dept. of Geological and Mining Engineering and Sciences*.
- [84] J. E Hansen and L. D. Travis. Light scattering in planetary atmospheres. *Space Science Reviews*, 16:527–610, 1974.
- [85] U. S. Committee on Extension to the Standard Atmosphere. U.s. standard atmosphere. *National Oceanic and Atmospheric Administration, Washington, D. C.*, 1976.
- [86] G. Mie. A contribution to the optics of turbid media, especially colloidal metallic suspensions. *Ann. Phys.*, 25:377–445, 1908.
- [87] K. Mulnonen, K. Lumme, J. Peltoniemi, and W. Irvine. Light scattering by randomly oriented crystals. *Appl. Opt.*, 28:3051–3060, 1989.
- [88] P. W. Barber and S. C. Hill. *Light Scattering by Particles: Computational Methods*. World Scientific Publishing, Singapore, 261 pp., 1990.
- [89] R. T. Wang and H. van de Hulst. Application of the exact solution for scattering by an infinite cylinder to the estimation of scattering by a finite cylinder. *Appl. Opt.*, 34:2811–2821, 1995.
- [90] M. I. Mishchenko, D. J. Wieland, and B. E. Carlson. T-matrix computations of zenith enhanced lidar backscatter from horizontally oriented ice plates. *Geoph. Res. Lett.*, 24:771–774, 1997.
- [91] Philip Laven. Software para el calculo numerico de la dispersion mie: <http://philiplaven.com/mieplot.htm>.
- [92] G. J. Fochesatto, M. B. Lavorato, A. L. Peuriot, E. J. Quel, C. A. Rosito, and G. D. Santiago. Simulación de señales de retrodispersión lidar. *Anales AFA (Asociacion Fisica Argentina), Villa Giardino, Cordoba*, 6(1), 1995.
- [93] Juan V. Pallotta, Pablo R. Ristori, Lidia A. Otero, Alberto Etchegoyen, and Eduardo Quel. Multiwavelength scanning raman lidar simulations for the cherenkov telescope array observatory. *Revista Optica Pura y Aplicada*, 2014.

- [94] Licel. Licel. <http://licel.com/>.
- [95] Petr Necesal for the Pierre Auger Collaboration. The fluorescence detector of the pierre auger observatory. *Journal of Physics: Conference Series* 293 012036. XIV International Conference on Calorimetry in High Energy Physics (CALOR 2010), 2011.
- [96] Jorg Ackerman. The extinction to backscatter ratio of tropospheric aerosol: A numerical study. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 15:1043–1050, 1998.
- [97] Juan V. Pallotta, Pablo R. Ristori, Francisco Gonzalez, Lidia A. Otero, Raul L. DELia, Ezequiel E. Pawelko, Mario Proyetti, Alberto Etchegoyen, and Eduardo Quel. Multi-wavelength scanning raman lidar development at ceilap (citefa-conicet). 2008.
- [98] P. Ristori, F. Gonzalez, J. Pallotta, L. Otero, M. Proyetti, E. Quel, F. Sanchez, and A. Etchegoyen. Multiwavelength scanning raman lidar for atmospheric transmission measurements in the frame of cta auger projects. *Asamblea general 2010 de la EGU .European Geosciences Union.en Viena, Austria, exposición invitada en la sesión AS1.16, High Resolution Active Optical Remote Sensing of Atmospheric Processes.*, Mayo 2 al 7, 2010.
- [99] Pablo Ristori, Juan Pallotta, Francisco González, Eduardo Quel, and Alberto Etchegoyen. Multiwavelength cta scanning raman lidar update. *Meeting de la Colaboracion CTA*, Mayo 11-13, 2009, Cracovia, Polonia.
- [100] Pablo Ristori, Francisco González, Juan Pallotta, and Eduardo Quel. Cta multiwavelength scanning raman lidar in argentina: Telescope main structure. *Meeting de la Colaboracion CTA*, Mayo, 10-12, 2010, Berlin, Alemania.
- [101] Pablo Ristori, Lidia Otero, Juan Pallotta, Fernando Chouza, Francisco González, Laterra, Mario Proyetti, and Eduardo Quel. Argentinean multiwavelength scanning raman lidar. *Meeting de la Colaboracion CTA*, Mayo de 2013, Chicago, Estados Unidos.
- [102] Pablo Ristori, F. Gonzalez, Juan Pallotta, Lidia Otero, M. Proyetti, Eduardo Quel, F. Sanchez, and A. Etchegoyen. Multiwavelength raman lidar construction at buenos aires: lidar mirror active positioning system. *Meeting de la Colaboracion CTA*, Octubre de 2012, 10-12 Mayo de 2010, Zeuthen, Alemania.
- [103] Pablo Ristori, Francisco González, Juan Pallota, Eduardo Quel, Federico Sánchez, and Alberto Etchegoyen. Cta multiwavelength scanning raman lidar in argentina: Telescope main structure. *Meeting de la Colaboracion CTA*, Montpellier, Francia, 2010.
- [104] Pablo Ristori, Lidia Otero, Juan V. Pallotta, Francisco Gonzalez, Andrea Pereyra, and Eduardo Quel. Cta lidar from ceilap. *Meeting de la Colaboracion CTA.*, 10/11 al 2/12 de 2011, Madrid, España.
- [105] Pablo Ristori, Lidia Otero, Juan Pallotta, Francisco González, Andrea Pereyra, Osvaldo Vilar, Mario Proyetti, and Eduardo Quel. Argentinean lidar system update mechanical structure, optical system, container, software. *Meeting de la Colaboracion CTA*, Mayo de 2012, Amsterdam, Holanda.

- [106] Pablo Ristori, Juan Pallotta, Francisco González, Eduardo Quel, and Alberto Etchegoyen. Multiwavelength cta scanning raman lidar update. *Meeting de la Colaboracion CTA*, Octubre 5-8, 2009, Zurich, Alemania.
- [107] Thomas C. Schelling. Dynamic models of segregation. 1:143–186, 1971.
- [108] Juan Pallotta, Pablo Ristori, Lidia Otero, Fernando Chouza, Delia Raul, Francisco Gonzalez, Alberto Etchegoyen, Eduardo Quel, and for the CTA consortium. Remote control and telescope auto-alignment system for multiangle lidar under development at ceilap, argentina. *Proceedings del Atmospheric Monitoring for High Energy Astroparticle Detectors (AtmoHEAD 2013), Saclay (France)*. *arXiv:1309.6535*, 2013.
- [109] www.digi.com.
- [110] <http://www.digi.com/products/wireless-wired-embedded-solutions/software-microprocessors-accessories/software/dynamicc>.
- [111] Siemens. Ilq1 datasheet. <http://pdf1.alldatasheet.es/datasheet-pdf/view/45332/siemens/ilq1.html>.
- [112] Juan V. Pallotta, Pablo R. Ristori, Lidia A. Otero, Francisco Gonzalez, Juan C. Dworniczak, Raul L. DElia, Ezequiel E. Pawelko, Fernando Chouza, Alberto Etchegoyen, and Eduardo J. Quel. Advances of the multiangle lidar for cta observatory at ceilap. 1:135–138, 2012.
- [113] P. Ristori, L. Otero, J. Pallotta, F. Gonzalez, A. Pereyra, M. Proyetti, E. Quel, F. Sanchez, and A. Etchegoyen. Status of the argentinean lidar. *Meeting de la Colaboracion CTA*, 15 de Mayo de 2011, Toulouse, Francia.
- [114] ROOT. Root: <http://root.cern.ch/drupal/>.
- [115] Licel GmbH. *Licel Ethernet Controller. Installation and Reference Manual*, Junio 2007.
- [116] Ulla Wandinger and Albert Ansmann. Experimental determination of the lidar overlap profile with raman lidar. *Applied Optics*, 41(3):511–514, 2002.
- [117] Juan V. Pallotta, Pablo R. Ristori, Lidia A. Otero, Francisco Gonzalez, Juan C. Dworniczak, Raul L. DElia, Ezequiel E. Pawelko, and Eduardo J. Quel. Remote control and telescope auto-alignment system for multiangle raman lidar under development at ceilap, argentina. *Revista Boliviana de Fisica*, pages XXX–XXX, 2011.
- [118] Luca Fiorani, Mario Armenante, Roberta Capobianco, Nicola Spinelli, and Xuan Wang. Self-aligning lidar for the continuous monitoring of the atmosphere. *Appl Opt.*, 37:4758–4764, 1998.
- [119] Bo Liu, Fan Yi, and Chang Ming Yu. Methods for optical adjustment in lidar systems. *Appl Opt.*, 44:1480–1484, 2005.
- [120] G. DAmico, A. Amodeo, V. I. Mattis, Freudenthaler, and G. Pappalardo. Earlinet single calculus chain. technical part 1: Preprocessing of raw lidar data. *Atmospheric Measurement Techniques AMTD*, 8:10387–10428.

- [121] V. Freudenthaler. Lidar rayleigh-fit criteria. *EARLINET-ASOS 7th Workshop*.
- [122] H. Baars, T. Kanitz, R. Engelmann, D. Althausen, B. Heese, M. Komppula, J. Preibler, M. Tesche, A. Ansmann, U. Wandinger, J. H. Lim, J. Y. Ahn, I. S. Stachlewska, V. Amiridis, E. Marinou, P. Seifert, J. Hofer, A. Skupin, F. Schneider, S. Bohlmann, A. Foth, S. Bley, A. Pfuller, E. Giannakaki, H. Lihavainen, Y. Viisanen, R. K. Hooda³, S. Pereira, D. Bortoli, F. Wagner, I. Mattis, L. Janicka, K. M. Markowicz, P. Achtert, P. Artaxo, T. Pauliquevis, R. A. F. Souza, V. P. Sharma, P. G. van, J. P. Beukes, J. Y. Sun, E. G. Rohwer, R. Deng, R. E. Mamouri, , and F. Zamorano. Pollynet: a global network of automated raman-polarization lidars for continuous aerosol profiling. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 15, 2015.
- [123] Juan Vicente Pallotta, Lidia Ana Otero, Pablo Roberto Ristori, and Eduardo Jaime Quel. Automatic method to detect aerosol plumes from a lidar signal. *Resumen enviado al proceedings del IX WLMLA, Santos, Brasil.*, 2016. Aceptada para su presentacion.
- [124] Ina Mattis, Albert Ansmann, Detlef Muller, Ulla Wandinger, and Dietrich Althausen. Multiyear aerosol observations with dual-wavelength raman lidar in the framework of earlinet. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 109, 2004.
- [125] A. Ansmann, U. Wandinger, M. Riebesell, C. Weitkamp, and W. Michaelis. Independent measurement of extinction and backscatter profiles in cirrus clouds by using a combined raman elastic-backscatter lidar. *Appl. Opt.*, 31:7113–7131, 1992.
- [126] A. Comerón, M. A. F. Rocadenbosch, A. López, C. Rodríguez, D. Muñoz, García-Vizcaíno, and M. Sicard. Effects of noise on lidar data inversion with the backward algorithm. *Applied Optics*, 43:2572–2577, 2004.
- [127] W. Hitschfeld and J. Bordan. 'errors inherent in the radar measurement of rainfall at attenuating wavelengths. *J. Appl. Meteorol.*, 11:58–67, 1954.
- [128] Earl W. Barrett and Oded Ben-Dov. Application of the lidar to air pollution measurements. *J. Appl. Meteor.*, 6(3):500–515, June 1967.
- [129] W. Viezee, E. E. Uthe , and R. T. H. Collis. Lidar observations of airfield approach conditions: an exploratory study. *J. Appl. Meteorol.*, 8:274–283, 1969.
- [130] P. A. Davis. The analysis of lidar signatures of cirrus clouds. *Appl. Opt.*, 8:2044–2102, 1969.
- [131] E. P. Zege, A. P. Ivanov, and I. L. Katsev. Determination of the extinction and scattering parameters of the water medium and the atmosphere by the analysis of erosion of the reflected pulse signal. *Bull. Acad. Sci. U. S. S. R. Geoph. Ser.*, 7:750–754, 1971.
- [132] Frederick G. Fernald, Benjamin M. Herman, and John A. Reagan. Determination of aerosol height distributions by lidar. *J. Appl. Meteor.*, 11(3):482–489, April 1972.
- [133] Frederick G. Fernald. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments. *Appl. Opt.*, 23(5):652–653, Mar 1984.

- [134] James D. Klett. Lidar calibration and extinction coefficients. *Appl. Opt.*, 22:514, February 1983.
- [135] Otero Lidia, Ristori Pablo, Fochesatto Javier, Wolfram Elian, Porteneuve Jacques, Flamant Pierre, and Quel Eduardo. First aerosol measurements with a multiwavelength lidar system at buenos aires, argentina. *Reviewed and Revised Papers Presented at the 22nd International Laser Radar Conference vol. II p.*, II:769–772, 2004.
- [136] Otero Lidia, Ristori Pablo, and Quel Eduardo. Multiwavelength aerosol and water vapor raman lidar system at ceilap, buenos aires, argentina. case study: November 10, 2006. *Optica Pura y Aplicada*, 41:171–175, 2008.
- [137] P. B. Russel, T. J. Swissier, and M. P. McCormick. Methodology for error analysis and simulation of lidar aerosol measurements. *Applied Optics*, 18:3783–3797, 1979.
- [138] G. J. Megie and R. T. Menzies. Complementarity of uv and ir differential absorption lidar for global measurements of atmospheric species. *Applied Optics*, 19:1173–1183, 1980.
- [139] V. E. Derr. Estimation of the extinction coefficient of clouds from multiwavelength lidar backscatter measurements. *Applied Optics*, 19:2310–2314, 1980.
- [140] K. Sassen and K. N. Liou. Scattering of polarized light by water droplet, mixed phase and ice cristal clouds: I. angular depolarizing and multiple scattering behavior. *J. Atm. Sci.*, 36:852–861, 1979.
- [141] R. G. Pinnick, S. G. Jennings, P. Chylek, C. Ham, and W. T. Grandy. Backscatter and extinction in water clouds. *J. Geoph. Res.*, 88:6787–6796, 1983.
- [142] V. A. Kovalev. Sensitivity of the lidar solution to errors of the aerosol backscatter to extinction ratio: influence of a monotonic change in the aerosol extinction. *Applied Optics*, 34:3457–3462.
- [143] Y. Sasano, E. V. Browell, and S. Ismail. Error caused by using a constant extinction to backscattering ratio in the lidar solution. *Applied Optics*, 24:3929–3932, 1985.
- [144] James D. Klett. Lidar inversion with variable backscatter/extinction ratios. *Appl. Opt.*, 24(11):1638–1643, Jun 1985.
- [145] C. Braun. General formula for the errors in aerosolproperties determined from lidar measurements at a singlewavelength. *Applied Optics*, 24:925, 1985.
- [146] A. Ansmann, M. Riebesell, and C. Weitkamp. Measurements of atmosferic aerosol extinction profiles with a raman lidar. *Optics Letters*, 15:746–748, 1990.
- [147] Gelsomina Pappalardo, Aldo Amodeo, Marco Pandolfi, Ulla Wandinger, Albert Ansmann, Jens Bosenberg, Volker Matthias, Vassilis Amiridis, Ferdinando De Tomasi, Max Frioud, Marco Iarlori, Leonce Komguem, Alexandros Papayannis, Francesc Rocadenbosch, and Xuan Wang. Aerosol lidar intercomparison in the framework of the earlinet project. 3. raman lidar algorithm for aerosol extinction, backscatter, and lidar ratio. *Applied Optics*, 43, 2004.

- [148] C. Robert and G. Casella. *Monte Carlo Statistical Methods*. Springer Verlag, 2004.
- [149] L. R. Hoxit and R. M. Henry. Diurnal and annual temperature variations in the 30-60 km region as indicated by statistical analysis of rocketsonde temperature data. *Journal of Atmospheric Science*, 30:922–933, 1973.
- [150] R. W. Lenhard. A revised assessment of radiosonde accuracy. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 54:691, 1973.
- [151] Ferrare R. A., S. H. Melfi, Whiteman D. N., K. D. Evans, F. J. Schmidlin, and Starr D. O. C. A comparison of water vapour measurements made by raman lidar and radiosondes. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 12:1177–1195, 1995.
- [152] D. N. Whiteman, K. D. Evans, B. Demoz, S.C. Starr D. O. C, E. W. Eloranta, D. Tobin, W. Feltz, G. J. Jedlovec, S. I. Gutman, G. K. Schwemmer, M. Cadirola, S. H. Melfi, and F. J. Schmidlin. Raman lidar measurements of water vapor and cirrus clouds during the passage of hurricane bonnie. *J. Geophys. Res.*, 106:5211–5225, 2001.
- [153] Anatoli Chaikovsky, Oleg Dubovik, Philippe Goloub, Didier Tanré, Gelsomina Pappalardo, Ulla Wandinger, Ludmila Chaikovskaya, Sergei Denisov, Yan Grudo, Anton Lopatsin, Yana Karol, Tatyana Lapyonok, Michail Korol, Fiodor Osipenko, Dzmitry Savitski, Alexander Slesar, Arnoud Apituley, Lucas Alados Arboledas, Ioannis Binietoglou, Panayotis Kokkalis, María José Granados Muñoz, Alexandros Papayannis, Maria Rita Perrone, Aleksander Pietruczuk, Gianluca Pisani, Francesc Rocadenbosch, Michael Sicard, Ferdinando De Tomasi, Janet Wagner, and Xuan Wang. Algorithm and software for the retrieval of vertical aerosol properties using combined lidar/radiometer data: dissemination in earlinet. *Reviewed and Revised Papers of the 26th International Laser Radar Conference*, 2012.
- [154] A.Lopatin, O. Dubovik, A. Chaikovsky, P. Goloub, T. Lapyonok, D. Tanre, and P. Litvinov. Enhancement of aerosol characterization using synergy of lidar and sun-photometer coincident observations: the garrlic algorithm. *Atmos. Meas. Tech.*, 6, 2013.
- [155] NetLogo. <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/>.

Índice de cuadros

2.2.1.Composición de la atmósfera terrestre [50].	34
2.3.1.Características microfísicas de los principales componentes aerosólicos.	39
2.3.2.Clasificación de los diferentes tipos de aerosoles en base a AOD_{440} y $\tilde{a}$	41
3.3.1.Características de los espejos dicróicos de la caja espectrométrica.	57
3.3.2.Características de los filtros pasa banda de la caja espectrométrica.	57
3.3.5.Cuadro comparativo de las características de 4 láseres considerados para el lidar de este trabajo.	58
3.4.1.Resumen de las variables del <i>hardware</i> utilizadas para la simulación del sistema lidar.	59
3.4.2.Parámetros atmosféricos utilizados en la simulación de la señal lidar. Los AOD son extremos para los sitios correspondientes a los dos Observatorios (Auger y CTA), mientras que los LR y $\tilde{a}$ son típicos para aerosoles desérticos.	60
4.2.1.Especificaciones de los motores paso a paso utilizados para el escaneo cenital/acimutal del lidar multiángulo.	71
4.2.2.Características de la plataforma de alineación de los telescopios.	77
4.2.3.Parámetros del lidar utilizados para la simulación del <i>overlap</i>	78
4.3.1.Especificaciones generales de los módulos de adquisición Licel.	85
4.3.2.Conexión de los diferentes fines de carrera y sensores de movimiento a la interfaz de entrada.	93
4.3.3.Conexionado de los pines del microcontrolador con los relés de cada dispositivo.	95
4.3.4.Conexionado de pines para el direccionamiento de los motores del lidar.	97
5.3.1.Variables de estado y las funciones que las modifican.	107
5.3.2.Diferentes variables de estado y su descripción.	109
5.3.3.Relación del bit de la variable mbSensorStatus junto con el sensor que controla.	111
5.3.4.Relación del bit de la variable mbRelayStatus junto con el relé que controla.	111
5.3.5.Principales valores de estado del láser (en hexadecimal) y sus nombres definidos en el código del programa.	112
5.3.6.Valores de la variable iLidarStatus , junto con una breve descripción de las mismas.	113
5.4.1.Valores de la variable compartida shmAdqTask	122
5.4.2.Valores a adoptar por la variable compartida shmScan	123
5.4.3.Variables del tipo <i>shared-memory</i> compartidas entre los procesos adq y lidarTask	126

6.4.1. Parámetros utilizados en la simulación del factor de <i>overlap</i>	150
6.4.2. Resoluciones de cada accionador junto con la cantidad de pasos de cada motor para cada etapa del proceso de auto-alineación.	160
8.2.1. Resumen de las ventajas y desventajas de los diferentes métodos de inversión disponibles en este lidar Raman multiángulo.	191
8.3.1. Parámetros ópticos de los aerosoles utilizados en la simulación para la caracterización de los errores de cada método.	193
8.3.2. Errores aleatorios del método TAM para la transmisión aerosólica y el AOD, para el rango de 0 a 3 <i>km</i>	196
8.3.3. Errores sistemáticos del método TAM para la transmisión aerosólica y el AOD, en el rango 0-3 <i>km</i> y una inhomogeneidad de 4 %.	198
8.3.4. Errores totales (aleatorios mas sistemáticos) del método de inversión TAM.	199
8.3.5. Errores aleatorios del método Raman para la transmisión y el espesor óptico aerosólico de la pluma simulada.	202
8.3.6. Errores sistemáticos del método Raman.	203
8.3.7. Errores totales del método de inversión Raman.	204
8.4.1. Valores entregados por el fotómetro solar de la red Aeronet instalado en el CEILAP, para el día 4/9/2015.	206
8.4.2. Valores de AOD y transmisión aerosólica para las longitudes de onda del lidar, obtenidas de los datos del fotómetro solar de Aeronet.	207
8.4.3. Resultados de la inversión TAM para las señales del día 4 de septiembre de 2015.	207
B.4.1. Direccionamiento de los motores del lidar.	249

Índice de figuras

1.1.1.Diagrama esquemático de un lidar, donde se pueden observar las principales partes. [21].	18
1.1.2.(a) Señal lidar cruda a la salida del fotomultiplicador y (b) señal lidar corregida en rango.	20
1.1.3.Diagrama esquemático de un lidar multiángulo [23].	21
1.1.4.Señal Raman de 607 nm corregida en rango.	22
1.2.1.Arreglo del Observatorio Pierre Auger. Se observa la disposición de los 4 sitios de fluorescencia y los más de 1660 tanques del detector de superficie.[31]	23
1.2.2.Desarrollo de una cascada o lluvia de partículas en la atmósfera, donde se indican las componentes principales generadas en la lluvia.[31]	24
1.2.3.Diseño conceptual del Observatorio CTA, donde se aprecian los telescopios de diferente tamaño.[37]	25
1.2.4.Representación esquemática de la cascada Cherenkov [39].	26
1.3.1.Error relativo de la transmisión aerosólica ($\Delta T/T$) en función del error ΔT	28
2.2.1.Diferentes capas de la atmósfera terrestre en función de su gradiente térmico.[49]	32
2.3.1.Tres distribuciones log-normales para diferentes modos de acumulación, definidos por el parámetro “a”. Para $a = 0$ no hay modo de acumulación, $a = 1$ modo de acumulación típico del aire contaminado [72].	40
2.3.2.Distribución de tamaños bi-modal entregada por el instrumento AERONET que posee la División Lidar en Villa Martelli. La misma corresponde al día 23 de agosto de 2004.	40
2.4.1.Diferentes tipos de dispersión en función de la relación de tamaño, longitud de onda y radio de la partícula. Las divisiones planteadas en este gráfico pueden variar según la bibliografía utilizada.[83]	45
2.4.2.Representación de la intensidad del ángulo de dispersión Rayleigh. Esta intensidad es máxima en la dirección de incidencia, y mínimo para el caso perpendicular a esta dirección.	46
2.4.3.Gráficos de la eficiencia de dispersión en función del radio de la partícula, para las 3 longitudes de onda emitidas por el láser. Este análisis fue realizado con el software MiePlot [91].	49
2.4.4.Representación cualitativa de la intensidad del ángulo de dispersión Mie para dos casos, donde la partícula del caso (a) es menor a λ y la del caso (b) es mayor, produciendo en este segundo caso un lóbulo frontal más pronunciado.	49
2.4.5.Diferentes tipos de dispersión: elástica y rotacional Stokes y anti-Stokes.	50

2.4.6. Espectro del coeficiente de retrodispersión Raman ($\beta_{\pi}^{N_2}$) que se obtiene al excitar a moléculas de N_2 , O_2 y H_2O con una radiación de longitud de onda de 355 nm. Se observan los lóbulos rotacionales centrados en la longitud de onda elásticas y sus correspondientes longitudes de onda vibracionales.[17]	51
3.3.1. Oblea de vidrio pulida parabólicamente sin aluminizar, correspondientes a uno de los telescopios del lidar.	55
3.3.2. Caja espectrométrica de 6 longitudes de onda adoptado para el lidar Raman multiángulo.[21]	56
3.4.1. Cantidad de telescopios en función del rango y la cantidad de perfiles acumulados (o tiempo de adquisición). Cada línea satisface la condición S/R=1.	62
3.4.2. Simulación de la relación S/R para las líneas elásticas (355 y 532 nm) y sus respectivas retrodispersiones Raman del nitrógeno (387 y 607 nm). La escala logarítmica permite apreciar mejor el comportamiento a grandes alturas.	63
3.4.3. Señales simuladas con 10 segundos de adquisición a 355 y 532 nm con sus respectivas señales Raman de nitrógeno.	63
3.4.4. Número de los perfiles acumulados que deben considerarse para asegurar una S/R=1 @ 10 km en función de la variación del AOD a 355 nm.	65
4.2.1. Plataforma de movimiento del proyecto SEON de CITEDEF.	69
4.2.2. Estructura de escaneo del lidar. Durante su construcción en los talleres del Departamento de Prototipos de CITEDEF (arriba), e instalado en el contenedor domo del lidar (abajo).	70
4.2.3. Disposición de los 6 telescopios sobre el plano de barrido cenital. En el centro del hexágono, se encuentra el orificio de salida del láser.	71
4.2.4. Foto del motor cenital con la transmisión instalada.	72
4.2.5. Diseño conceptual en 3D del primer soporte de telescopio realizado.	73
4.2.6. Primer prototipo del soporte del telescopio.	74
4.2.7. Parte inferior de la oblea del telescopio con su soporte pegado.	74
4.2.8. Versión final del telescopio con su sistema de soporte.	75
4.2.9. Representación esquemática del campo de visión del telescopio (FOV) y el láser (no en escala). Para una mejor descripción del sistema y sus movimientos, se muestra también, los nombres de los ejes de coordenadas utilizados.	75
4.2.10. Plataforma de alineación del telescopio (sin el espejo). En el orificio central se conecta el telescopio por medio de su sistema de sujeción.	76
4.2.11. Controles de alineación de cada telescopio. (a) Control manual accedido desde la parte superior. (b) Control automático/remoto, ejecutado por medio de motores paso-a-paso.	76
4.2.12. Factor de <i>overlap</i> de cada telescopio, resultante de la configuración listada en el cuadro 4.2.3.	78
4.2.13. (a) Disposición teórica de mayor acercamiento de los telescopios entre sí y con respecto al láser. (b) Factor de <i>overlap</i> resultante de la disposición de (a).	79
4.2.14. Vista general del contenedor-domo que alberga al lidar multiángulo.	80
4.2.15. Imagen de uno de los cilindros de apertura cierre (derecha), y sistema de bomba y panel de control (izquierda).	80

4.3.1.	Diagrama esquemático del sistema Lidar Raman Multiángulo, donde se observan las diferentes vinculaciones entre los diferentes dispositivos. . . .	82
4.3.2.	(a) Divisor de señal a la salida del router ubicado en el lidar. Se observa la antena unidireccional que brinda señal WiFi en todo el contenedor en casos de conectarse por tareas de mantenimiento en el lugar. (b) Antena direccional que apunta a su contraparte ubicada en el router con la PC de Control.	84
4.3.3.	Diagrama en bloques del Licel utilizado en esta trabajo [94].	86
4.3.4.	Vista frontal del <i>rack</i> conteniendo los 3 módulos Licel.	86
4.3.5.	Módulo Rabbit RCM 2200. En la capa inferior, se pueden observar los pines de entrada/salida.	89
4.3.6.	Diagrama esquemático del funcionamiento de los <i>co-states</i>	90
4.3.7.	Diagrama en bloques general de las conexiones del microcontrolador con los demás dispositivos.	91
4.3.8.	Diagrama en bloques de la electrónica de interfaces de entradas.	92
4.3.9.	Diagrama esquemático de la electrónica de entradas.	92
4.3.10.	Diagrama en bloques de la electrónica de interfaces de salida.	94
4.3.11.	Diagrama esquemático de la electrónica de salida.	95
4.3.12.	Placa de la electrónica de control. Esta placa contiene al modulo del microcontrolador como a las interfaces de entrada y salidas descritas.	96
4.3.13.	Diagrama esquemático de la electrónica de control de los motores paso-a-paso.	97
4.3.14.	Foto de la electrónica de control de los motores paso-a-paso.	98
4.4.1.	Lidar Raman multiángulo.	99
5.2.1.	Disposición esquemática del sistema, donde se observa la vinculación entre la PC de Control y los diferentes dispositivos en el lidar.	103
5.2.2.	Distribución de los diferentes procesos en la PC de Control y su vinculación con el <i>firmware</i> y <i>web-server</i> del lado del microcontrolador.	104
5.3.1.	Interacción entre los diferentes procesos de la PC de Control y las variables estado que poseen el <i>firmware</i> del microcontrolador.	110
5.3.2.	Interface indexADMIN.html servida por el microcontrolador para el control manual de los diferentes dispositivos del lidar.	115
5.3.3.	Interface indexSHIFTER.html servida por el microcontrolador para la operación automática del <i>hardware</i> del lidar.	116
5.4.1.	Procesos de la PC de Control y su vinculación mediante diferentes métodos IPC.	118
5.4.2.	Diagrama esquemático de la vinculación de los diferentes procesos de la PC de Control con los dispositivos en el lidar multiángulo. Notar los diferentes colores para identificar la vinculación entre el proceso y el dispositivo. . . .	118
5.4.3.	Interfaz de usuario del proceso adquisición.	120
5.4.4.	Esquema general de funcionamiento del proceso adq . Se explicitan las variables shared-memory principales para la operación del mismo.	121
5.4.5.	Diagrama de flujo general del proceso lidarTask	125
5.4.6.	Referencia del sistema de coordenadas cenital-acimutal. En celeste se representa al contenedor, y en naranja el escaneo del lidar junto con la referencia usada de sus coordenadas.	131
5.4.7.	Interfaz gráfica del proceso plot , donde se puede observar la señal lidar de 532 nm.	135

5.4.8. Esquema general de funcionamiento del proceso plot	136
5.5.1. Procesos adq , plot y lidarTask en ejecución. Se observa que los dos primeros poseen interfaz gráfica, mientras que lidarTask sólo vuelca información en una terminal.	139
5.5.2. Señalización ubicada en las paredes del contenedor.	141
6.2.1. Esquema de los elementos intervinientes (<i>hardware</i> y <i>software</i>) en la auto-alineación de telescopios.	145
6.3.1. Diagrama de flujo del proceso de auto-alineación. Se observa la interacción entre los diferentes procesos en la PC de control, como también, su interacción con los motores de los telescopios por medio del microcontrolador.	146
6.3.2. Representaciones esquemáticas (no en escala) de los barridos ortogonales realizado por el telescopio en el procedimiento de auto-alineación. (a) Barrido Este-Oeste, (b) barrido Norte-Sur, (c) foto de uno de los telescopios sobre su plataforma de alineación, donde se aclaran la identificación de los accionadores utilizados para cada movimiento.	148
6.4.1. Simulación del factor de <i>overlap</i> a 10 <i>km</i> . La forma irregular de las figuras es debido al método de simulación empleado, el cual, está basado en el método Monte Carlo (ver apéndice A).	151
6.4.2. Comparación de las simulaciones del factor de <i>overlap</i> para dos alineaciones: ejes láser-telescopio paralelos (negro), y con el telescopio inclinado -0,125 <i>mrad</i> (rojo). Estas simulaciones se realizaron con el <i>software</i> realizado para este trabajo (apéndice A).	152
6.4.3. Señales corregidas en rango, donde se aprecia la diferencia de la corrección por factor de <i>overlap</i>	153
6.4.4. Simulación del factor de <i>overlap</i> dividido por r^2 , denominado por algunos autores como factor G [17]. Se observa el pico a los 780 m.	154
6.4.5. Factor G para diferentes ángulos de inclinación, correspondientes a los máximos para <i>overlap</i> =1. Se muestra en cada caso, la inclinación óptima en color negro: -0,125 <i>mrad</i> sobre el eje Este-Oeste.	155
6.4.6. Señal lidar de 532 <i>nm</i> , adquirida el 24/06/2015 con 1 solo telescopio. Se observa un cirrus entre los 11 y 13 <i>km</i> , y la posición del pico de la señal lidar dentro de los márgenes esperados.	156
6.4.7. Valor del factor de <i>overlap</i> desalineado de 1 telescopio para poder ser detectado por la electrónica de adquisición. Este cálculo es realizado para la señal de 532 <i>nm</i> , la cual, es la utilizada para la auto-alineación.	159
6.4.8. Simulación del factor de <i>overlap</i> a 10 <i>km</i> . La forma irregular de las figuras es debido al método de simulación empleado, el cual, está basado en Monte Carlo A.	160
7.2.1. Aproximación de un perfil molecular puro de 532 <i>nm</i> (línea roja) en la zona molecular de una señal adquirida a la misma longitud de onda.	166
7.2.2. Ejemplo del procedimiento de detección de zonas moleculares en una señal lidar elástica.	168
7.2.3. Simulación de una señal lidar elástica corregida en rango de 532 <i>nm</i> con una pluma de aerosoles a los 6 <i>km</i> . Se observan antes y después de la pluma los perfiles lidar elásticos moleculares puros ajustados para la minimización del error RMS.	169

7.2.4.Simulación de una señal lidar Raman corregida en rango de 607 <i>nm</i> , con una pluma de aerosoles a los 6 <i>km</i> . Se observan antes y después de la pluma los perfiles lidar Raman moleculares puros ajustados para la minimización del error RMS.	169
7.3.1.Ejemplo de comportamiento de señales lidar elásticas y Raman ante la presencia de nubes o plumas de aerosoles. [16]	171
7.3.2.Señales Raman simulada de 387 (a) y 607 <i>nm</i> (b), junto con el resultado de su filtrado para las zonas moleculares (líneas azul), como para las zonas aerosólicas (líneas rojas)..	172
7.3.3.Señal elástica para (a) 355 <i>nm</i> y (b) 532 <i>nm</i> , adquiridas con 10 <i>s</i> de promediación. En ambos gráficos, en negro se observa la señal adquirida, mientras que en azul (355 <i>nm</i>) y verde (532 <i>nm</i>) el resultado del filtrado.	172
7.4.1.Set de 10 señales lidar corregidas en rango simuladas, con 10 <i>s</i> de adquisición y un AOD de 0,1. Para una mejor apreciación, se las grafican corregidas en rango ($P_i(r).r^2$).	175
7.4.2.Error relativo porcentual del set de señales simuladas a 355 y 532 <i>nm</i> , para ángulos cenitales de 0° y 45°.	175
7.4.3.Set de señales elásticas filtradas, con una ventana de barrido de 300 bins (2250 <i>m</i>). En cada gráfico, se muestra un zoom de una parte de la señal para poder apreciar los diferentes perfiles. Por motivos de simplicidad, se muestran las señales de 355 y 532 <i>nm</i> sólo en la vertical.	176
7.4.4.Error de las señales filtradas para (a) 355 y (b) 532 <i>nm</i> , para 0° y 45°.	176
7.4.5.Errores de la señal elástica luego de un filtrado de media móvil.	177
7.4.6.Set de señales Raman simuladas, utilizando 10 <i>s</i> de adquisición.	178
7.4.7.Error relativo del set de señales Raman simuladas para 10 <i>s</i> de adquisición.	178
7.4.8.Set de señales Raman filtradas. Se observa una reducción significativa del ruido en comparación con las señales simuladas.	179
7.4.9.Error relativo del set de señales Raman filtradas.	179
7.4.10Errores de la señal Raman luego de un filtrado de media móvil.	180
8.3.1.Secuencia esquemática del cálculo de los errores de método TAM.	193
8.3.2.Factor de amplificación ($1/2C$) debido al ángulo cenital de la señal $P_s(z)$	194
8.3.3.Error relativo máximo de la señal $P_s(z_m)$ para cumplir con las condiciones impuestas en 8.3.5. Este error es para una altura de $z_m = 3km$	195
8.3.4.Eschema utilizado para representar la inhomogeneidad atmosférica en el espesor óptico atmosférico por medio del factor H	197
8.3.5.Simulación del coeficiente de extinción a 355 <i>nm</i> y de las señales Raman para 387 y 607 <i>nm</i> . Se observa en ambas figuras una pluma a los 6 <i>km</i>	200
8.3.6.Secuencia esquemática del cálculo de los errores aleatorio del método Raman.	201
8.3.7.Perfiles del coeficiente de extinción para las longitudes de onda 355 y 532 <i>nm</i> . Se observan los perfiles originales junto con el set de resultados producto de la inversión de cada señal del set simulado.	201
8.3.8.Perfiles del coeficiente de extinción para las longitudes de onda 355 y 532 <i>nm</i> . Se observan los perfiles originales junto con el set de resultados producto de la inversión del set de datos simulado.	203

8.4.1.Señales adquiridas el 5/11/2015. Paneles superiores (a y b): Raman; paneles inferiores (c y d): elásticas. Se muestran las señales adquiridas en la vertical y en ángulo de 45° cenitales, para un tiempo de adquisición de 6 min aproximadamente.	205
8.4.2.Perfiles de extinción obtenidos de la inversión Raman para la vertical y en ángulo.	206
8.4.3.Señales elásticas adquiridas el 4 de septiembre de 2015, para las longitudes de onda de 355 y 532 nm, con 10 segundos de adquisición, tomadas en la vertical y a un ángulo de 45°	207
A.2.1(izq.) Ubicación espacial del plano de la fibra óptica y sus coordenadas. (der.) Ejemplo esquemático de un estado de <i>overlap</i> a una altura dada del recorrido del láser. El programa descrito en este apéndice muestra una animación de los fotones en el plano de la fibra óptica ($x_{fo} - y_{fo}$).	238
A.3.1Sistema de coordenadas utilizado, y ubicación de los componentes (no en escala).	239
A.3.2Programa de simulación del overlap del lidar en ejecución.	240
A.4.1Esquema de rayos en 2D para la reflexión particular del centro del telescopio (no es escala).	244
A.4.2Esquema en 2D (no en escala) para mayor simplificación del trazado de rayos, donde se observa el primer rayo lanzado (en negro), y 2 más aleatorios, todos pasando por el punto de focalización ya obtenido.	245
A.4.3Diagrama de flujo general del algoritmo.	246
C.3.1Ejemplo de una mala elección del ancho de la ventana de exploración utilizada.	253

Apéndice A

Algoritmo de simulación de la función overlap

A.1. Introducción

Se describirá en este apéndice el algoritmo de simulación del *overlap* realizado para este trabajo. Para esto, se realizó un *software*, el cual, por medio del ingreso de parámetros característicos del lidar a simular, entrega el factor de overlap del sistema.

El factor de *overlap* nos da la información de cuantos fotones son detectados por el sistema receptor en función de la altura en la que se encuentra el pulso láser. El conocimiento de esta función es muy importante, ya que posee la información de la alineación del sistema, modulando el factor atmosférico de la ecuación lidar. Si la alineación no es la correcta, la calidad de la señal lidar obtenida se verá afectada, produciendo un error en los coeficientes atmosféricos invertidos. Conocer este parámetro es importante ya que nos permite conocer características de alineación de la señal esperada.

Para esto se realizó un *software* basado en Monte Carlo [148], el cual, ingresando los parámetros del lidar que se desea simular, entrega el factor de *overlap*. Esta herramienta es muy útil, y aporta información para el algoritmo de auto-alineación descrito en el capítulo 6.

A.2. Conceptos ópticos utilizados

Para este trabajo, se realizarán simplificaciones de varios conceptos ópticos, principalmente, mediante la consideración de varios parámetros como ideales. Sin embargo, esto no alejará los resultados obtenidos de la realidad, si no, que nos dará un marco en donde poder operar de manera mas cómoda y con tiempos de computo menores.

Un telescopio parabólico ideal es un elemento óptico el cual, por cada punto del objeto a replicar (en este caso, el *spot* del láser) genera un punto en el espacio de la imagen, a la distancia de su plano focal (z_f). Esta distancia depende del foco del telescopio (f) y de la distancia del objeto que se desea replicar (z_s), en nuestro caso, el pulso láser que avanza a través de la atmósfera. La ecuación del telescopio parabólico que nos da la distancia a la cual está focalizando la imagen es:

$$z_f = \frac{1}{\frac{1}{f} - \frac{1}{z_s}} \quad (\text{A.2.1})$$

Por lo tanto, en un análisis teórico de trazado de rayos, podemos decir que todos los rayos que salen de un punto del objeto a la distancia z_s , y se reflejan en el telescopio de distancia focal f , se cruzarán en un único punto de focalización a una altura dada por z_f . Las coordenadas $x - y$ del punto imagen dependerá de la posición relativa del objeto (*spot* láser) con respecto al eje del telescopio. También, en función de la posición del detector del telescopio y de su diámetro (para este caso, la fibra óptica), se colectarán más o menos de los fotones, y esto es lo que finalmente dará el factor de *overlap*. Para una distribución uniforme de fotones en el pulso láser, este factor estará dado por el área de intersección entre la imagen del *spot* láser en el plano del detector, y el detector mismo. Un esquema de esto se puede ver en la figura A.2.1.

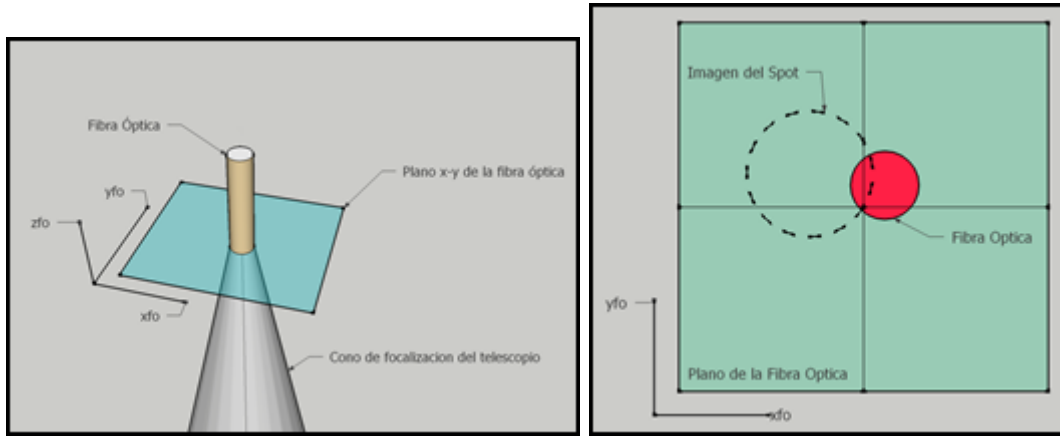


Figura A.2.1: (izq.) Ubicación espacial del plano de la fibra óptica y sus coordenadas. (der.) Ejemplo esquemático de un estado de *overlap* a una altura dada del recorrido del láser. El programa descrito en este apéndice muestra una animación de los fotones en el plano de la fibra óptica ($x_{fo} - y_{fo}$).

En el diagrama de la izquierda de la figura A.2.1, se observa el plano ($x_{fo} - y_{fo}$) de la fibra óptica, el cual, es el plano que corta al cono de focalización del telescopio a la altura z_{fo} en el que se ubica la fibra óptica. En el diagrama de la derecha, se puede observar un ejemplo de la intersección de estas dos circunferencias, siendo el factor de *overlap*, la proporción de la imagen del *spot* que se ubica dentro de la fibra óptica. Cuanto mayor sea el área de la imagen dentro de la fibra óptica, mayor será el factor de *overlap*, siendo su máximo 1, donde toda la imagen se encuentra dentro de la fibra, y resultando cero cuando no hay fotones en ella.

A.3. Implementación con el *software* NetLogo

El planteo de la expresión teórica del factor de *overlap* lleva a expresiones matemáticas complejas [49]. La solución a este problema se puede simplificar si es realizado por medio del software **NetLogo** [155], el cual, permite una implementación sencilla de métodos de agentes. De esta manera, se interpretan a los agentes como los fotones retrodispersados del pulso láser a una determinada altura z , los cuales parten hacia el telescopio, se reflejan en él, y finalmente llegan al plano de la fibra óptica. En este punto, se obtienen las coordenadas $x - y$ del fotón y se verifica si se encuentra o no dentro del área de la fibra óptica. De esta manera, se obtiene el factor de *overlap* dividiendo la cantidad de fotones que están dentro de la fibra óptica por la cantidad total de fotones que llegaron

al plano de análisis. El resultado de esto es una aproximación al cociente de áreas entre la intersección de las dos circunferencias y el área total de la imagen del láser, el cual, es el verdadero factor de *overlap*. La precisión de este valor dependerá de la cantidad de fotones (agentes) en el estudio, pero este incremento hace más lenta la simulación. La elección de estos parámetros es un compromiso entre la velocidad que se desea en la simulación y la exactitud en el resultado que busquemos. La utilización del método de agentes nos reduce el cálculo del factor de *overlap* a un simple conteo de fotones más una división. La parte compleja de este trabajo está en la obtención de las coordenadas de los fotones en el plano del detector.

A.3.1. Sistema de referencia utilizado

Debido al carácter geométrico del problema a resolver, es necesario definir el sistema de referencia utilizado en la simulación. El sistema de coordenadas y las posiciones relativas de sus componentes se observan en la figura A.3.1.

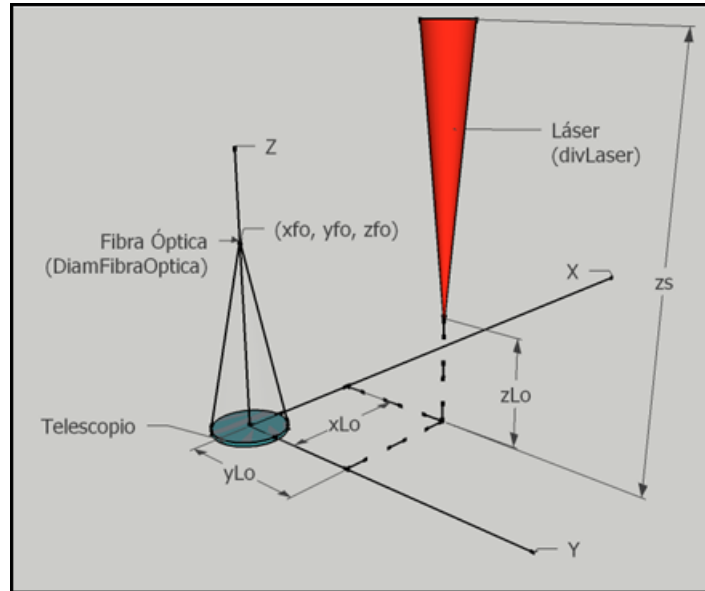


Figura A.3.1: Sistema de coordenadas utilizado, y ubicación de los componentes (no en escala).

Como se observa en la figura A.3.1, el telescopio se ubica en el origen de los ejes de coordenadas, sobre el plano $x - y$, quedando a libre elección la posición relativa del láser (x_{Lo}, y_{Lo}, z_{Lo}) .

Algunos de los parámetros que se observan en la figura A.3.1 pueden configurarse por medio de los controles de la interfaz gráfica. Ellos son:

- Coordenadas del láser (x_{Lo}, y_{Lo}, z_{Lo}) .
- Divergencia del láser $(divLaser)$.
- Diámetro de la fibra óptica $(DiamFibraOptica)$.
- Coordenadas de la fibra óptica (x_{fo}, y_{fo}, z_{fo}) .
- Inclinación del telescopio con respecto al láser a lo largo de ambos ejes (t_x, t_y) .

Toda esta información es necesaria para el cálculo de la función de *overlap*.

A.3.2. Utilización del software

La idea principal de este software es la de obtener el factor de *overlap* por medio del mapeo de los fotones que llegan al plano de la fibra óptica. Cada una de las coordenadas de estos fotones, es comparada con respecto a la posición de la fibra óptica, para así obtener la proporción que se encuentran dentro de la misma.

Esto ha sido implementado *con el software NetLogo*, ya que simplifica mucho su programación, permitiendo además la visualización de los fotones en dicho plano. Esto resulta muy didáctico, y a la vez facilita el análisis de la alineación en función de los diferentes parámetros.

El *layout* del programa realizado se observa en la figura A.3.2.

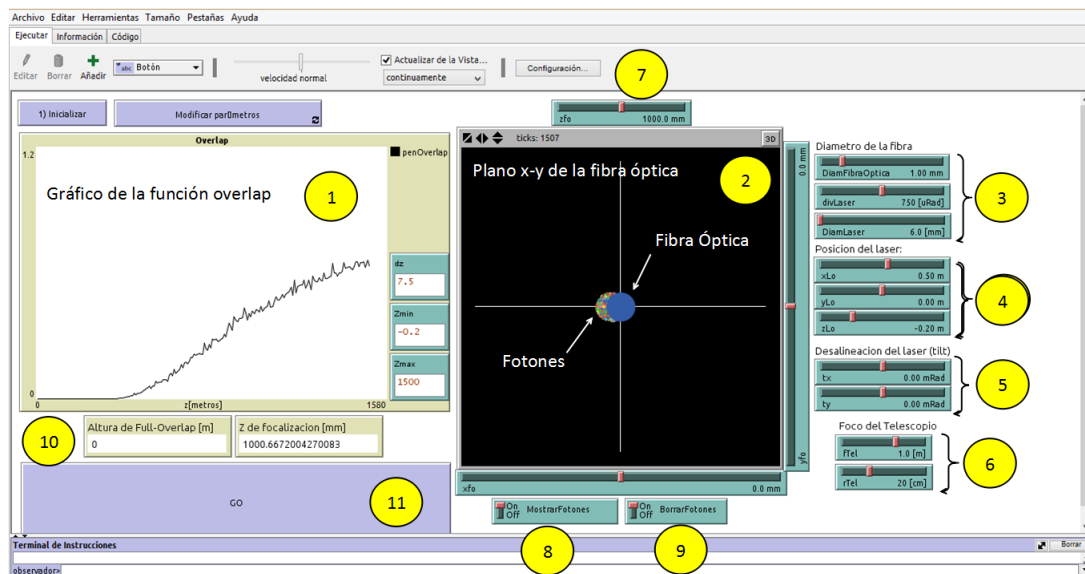


Figura A.3.2: Programa de simulación del overlap del lidar en ejecución.

A continuación se describirá cada control del programa y su operación.

A.3.3. Modo de Operación

Por medio de los controles de su interfaz gráfica, se puede configurar los parámetros necesarios para la simulación. Lo primero que se debe hacer es presionar el botón **"1) Inicializar"**, para setear las principales variables y cargar valores por defecto. Luego, se procede a configurar los parámetros por medio de los *slides*, adecuándolos a las características del sistema lidar a simular.

A.3.3.1. Descripción de los controles

Cada uno de los controles a describir serán referenciados en función de la enumeración de la figura A.3.2:

1. Ejes de coordenadas donde se graficará la función *overlap*. Sobre el eje de abscisas se encuentra el rango en metros, y en el eje de ordenadas, el valor de la función *overlap* (0-1). Una vez finalizada la simulación, desde este panel se puede exportar los datos de la función *overlap* simulada a un archivo de texto para su uso en otro entorno, como por ejemplo, en la simulación de la señal lidar.

2. Plano $x - y$ de la fibra óptica ($x_{fo} - y_{fo}$ según sistema de coordenadas en la figura [A.3.1](#)). Por medio de los *slides* ubicados a la derecha y abajo de este sector, se modifican estas coordenadas. La coordenada z_{fo} de este plano es configurado con el control (3). En el centro de este plano se ubica el eje de coordenadas, el cual, corresponde también al eje del telescopio. El círculo azul que se observa es la fibra óptica, cuyo diámetro se modifica también en el grupo de controles ubicados en (3).
3. Controles para la configuración de:
 - a) Diámetro de la fibra óptica (*DiamFibraOptica*).
 - b) Divergencia del láser (*divLaser*).
 - c) Diámetro inicial del láser (*diamLaser*).
4. Posición $x - y - z$ del láser con respecto al centro del telescopio. Variables (x_{Lo}, y_{Lo}, z_{Lo}) en el sistema de coordenadas de la figura [A.3.1](#).
5. Inclinação del láser con respecto a la vertical (eje z).
 - a) t_x : *tilt* a lo largo del eje x .
 - b) t_y : *tilt* a lo largo del eje y .
6. Características del telescopio:
 - a) Radio (*rTel*), en centímetros.
 - b) Distancia focal (*fTel*), en metros.
7. Coordenada z de la fibra óptica (z_{fo}) (ver sistema de coordenadas en la figura [A.3.1](#)).
8. Control para mostrar los fotones en el plano $x - y$ de la fibra óptica. Definiendo este control en **OFF** evitamos que se muestre la trayectoria de los fotones, y la ejecución del programa será más rápida.
9. Permite borrar (**ON**), o no borrar (**OFF**), la trayectoria de los fotones en el plano $x - y$ (panel 2). Si se deja este control en **OFF**, se observará la traza que dejan los fotones en el plano de la fibra óptica. Esto es de mucha utilidad en el caso que la posición z de la fibra óptica (z_{fo} , control descrito en el punto 7) sea superior a la distancia focal del telescopio (control descrito en el punto 6). De esta manera, se podrá saber cuál es la mejor posición para ubicar la fibra óptica, y cuál debe el diámetro óptimo de la misma.
10. Altura del primer punto de *full-overlap*, y su correspondiente z_f (ec. [A.2.1](#)).
11. Botón de largada de la simulación.

A.3.3.2. Operación del programa

1. Inicializar las variables globales por medio del botón "**1) Inicializar**".
2. Configurar las variables necesarias para que se ajusten a los parámetros de simulación que se desea realizar.
3. Correr la simulación presionando "**GO**".

Si se desea ejecutar nuevamente la simulación, independientemente que se hayan o no modificado los parámetros, es necesario presionar nuevamente el botón "**1) Inicializar**".

El botón "**Modificar parámetros**", sirve para poder modificar la configuración del sistema con la simulación en ejecución. Esto permite ver los cambios en tiempo real, sin esperar a que la simulación termine.

A.4. Matemática utilizada

Como introducción al desarrollo matemático, se dará una breve descripción al método de trazado de rayos utilizado en este trabajo. El mismo contempla varias simplificaciones las cuales se deberán tener en cuenta.

A.4.1. Consideraciones ópticas para el análisis

En esta sección se describirá el trazado de rayos y formación de imagen utilizado en este algoritmo. Para esto se tiene en cuenta algunas simplificaciones, evitando rigurosidades de procedimientos ópticos, solo con el objetivo de agilizar los tiempos de cálculo. Estas consideraciones son:

- El telescopio es parabólico y se considera ideal, sin tener en cuenta defectos en la imagen debido a aberraciones, astigmatismo y figuras de difracción.
- No se considera la apertura numérica de la fibra óptica, por lo que todos los fotones que llegan al área delimitada por su diámetro serán tomados como fotones detectados. Esto es el equivalente a decir que el telescopio está dentro del campo de visión de la fibra óptica con una efectividad del 100 %.
- Todos los fotones del pulso láser emitido están distribuidos uniformemente en una circunferencia de diámetro igual a: $DiametroInicialLaser + DivergenciaDelLaser * zPulso$.

Solo se utilizará una sola ecuación óptica (ec. A.2.1), y el resto se realizará con por medio de un análisis vectorial. Esto permitirá conocer la imagen formada en el plano de la fibra óptica. El conocimiento del proceso de formación de imagen del telescopio es el punto mas importante para conocer el factor de *overlap* de este estudio. Por medio de esto, se podrá conocer la proporción de la imagen del *spot* láser en la superficie de la fibra óptica.

A.4.2. Trazado de rayos

Este método utiliza las ecuaciones vectoriales de la recta para representar a los rayos, los cuales representan el recorrido de los fotones. Estos son retrodispersados desde el pulso láser en la atmósfera hacia el telescopio y reflejados hacia el plano donde se ubica la fibra óptica. Los cálculos que se describen a continuación son realizados para cada fotón, y de esta manera, generar la imagen del *spot* láser en el plano de la fibra óptica.

Para poder definir una recta y poder representar los rayos incidentes y reflejados, necesitamos definir 2 puntos de la misma. Se describe a continuación la nomenclatura utilizada:

- Para los vectores incidentes al telescopio ($\vec{V}_{st}$: vector *spot*-telescopio). Los puntos utilizados para formarlo son:
 - Punto del *spot* láser (P_s), obtenido de forma aleatoria dentro de su área.
 - Punto del telescopio (P_t), donde se reflejará el rayo.
- Para los vectores reflejados del telescopio ($\vec{V}_r$). Los puntos utilizados son:
 - Punto del telescopio en donde incide el rayo (P_t)
 - Punto de focalización (P_f), ya que por definición del telescopio ideal, todos los rayos que provienen de un punto del objeto, se cruzarán en un solo punto focal, a una distancia dada por la ecuación A.2.1.

Conociendo las coordenadas de estos 3 puntos (P_s , P_t y P_f), se está en condiciones de conocer las expresiones vectoriales del vector $\vec{V}_r$, y por lo tanto, conociendo la altura de la fibra óptica (coordenada z_{fo}), se podrá obtener las coordenadas $x - y$ del fotón en dicho plano. Finalmente, con las coordenadas $x - y - z$ del fotón analizado, se podrá saber si está dentro o fuera de la fibra óptica, y así obtener el factor de *overlap*. Todo este procedimiento se realiza para cada rayo (fotón) que parte del láser, desde varias posiciones aleatorias, y para cada altura de análisis a lo largo del rango que se desea analizar.

A.4.3. Desarrollo

Se expresa de manera vectorial un rayo incidente al telescopio ($\vec{V}_{st}$: vector *spot*-telescopio) y el reflejado como la expresión vectorial de la recta. Esto es:

Rayo incidente al telescopio:

$$\begin{cases} \vec{V}_{st} &= \lambda_i \vec{d}_{st} \\ \vec{d}_{st} &= P_t - P_s \longrightarrow \text{Vector director spot - telescopio} \end{cases} \quad (\text{A.4.1})$$

Rayo reflejado del telescopio:

$$\begin{cases} \vec{V}_r &= P_t + \lambda_r \vec{d}_r \\ \vec{d}_r &= P_r - P_t \longrightarrow \text{Vector director reflejado} \end{cases} \quad (\text{A.4.2})$$

donde el punto sobre el spot láser P_s y el punto sobre el telescopio P_t son datos obtenidos de forma aleatoria dentro de sus áreas, y los λ_x , son constantes.

Para obtener el punto P_r perteneciente al vector reflejado $\vec{V}_r$, se hace uso de un rayo incidente particular, que parte de P_s y pasa por el centro del telescopio, el cual, su reflexión puede considerarse como un reflejo sobre una superficie plana horizontal. Este punto, como todos los que parten de P_s y se reflejan en el telescopio, pasan por el punto de focalización. Esto se muestra esquemáticamente en la figura A.4.1.

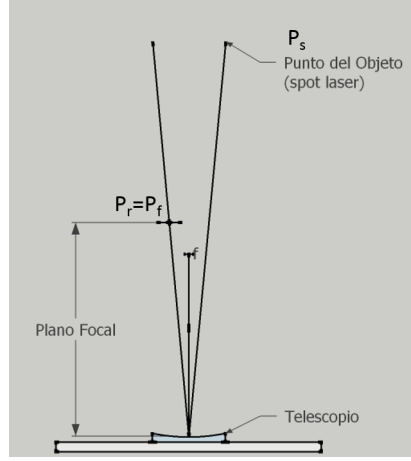


Figura A.4.1: Esquema de rayos en 2D para la reflexión particular del centro del telescopio (no es escala).

Para este caso podemos escribir:

$$\begin{cases} P_s &= (x_s, y_s, z_s) \\ P_t &= (0, 0, 0) \\ P_r &= (-x_s, -y_s, z_s) \end{cases} \quad (\text{A.4.3})$$

Donde P_s es obtenido de manera aleatoria dentro de los límites del *spot* del láser, P_t es el punto de reflexión del telescopio, en este caso particular, el centro de coordenadas (ver sección A.3.1), y P_r , por ser una reflexión simétrica, adopta valores en función de P_s . Además, podemos asignar a $P_r = P_f$, siendo $P_f = (x_f, y_f, z_f)$, las coordenadas del punto de focalización. Con estos datos podremos obtener λ_r de A.4.2, y las coordenadas (x_f, y_f) en el plano focal, ya que z_f se obtiene de la ecuación A.2.1.

Reemplazando estos valores en el set de ecuaciones A.4.2 se obtiene:

$$\begin{cases} \vec{d}_r &= P_r - P_t = (-x_s, -y_s, z_s) - (0, 0, 0) = (-x_s, -y_s, z_s) \\ \vec{v}_r &= P_t + \lambda_r \vec{d}_r = (0, 0, 0) + \lambda_r (-x_s, -y_s, z_s) \end{cases}$$

Expresamos para obtener de manera paramétrica las coordenadas de V_r :

$$\vec{v}_r = (x_r, y_r, z_r) = (-x_s \lambda_r, -y_s \lambda_r, z_s \lambda) \quad (\text{A.4.4})$$

por lo tanto:

$$\begin{cases} x_r &= -x_s \lambda_r \\ y_r &= -y_s \lambda_r \\ z_r &= -z_s \lambda_r \end{cases} \quad (\text{A.4.5})$$

y como $z_r = z_f$, se obtiene su valor por medio de la ecuación A.2.1. Esto nos permite por lo tanto, conocer la constante λ_r como:

$$\lambda_r = \frac{z_f}{z_s} \quad (\text{A.4.6})$$

Esta constante λ_r es la que multiplica al vector director reflejado para ubicarnos en el plano focal, y obtener las coordenadas (x_f, y_f) . De esta manera, llegamos a obtener las coordenadas de focalización (x_f, y_f, z_f) para todos los rayos que salgan del punto P_s .

Esto nos permite conocer las coordenadas de un punto del vector reflejado P_r , el cual, se tiene la certeza que pasará por allí sin importar en que punto del telescopio se refleje.

Por lo tanto, al plantear varios rayos desde el punto P_s hacia puntos aleatorios del telescopio:

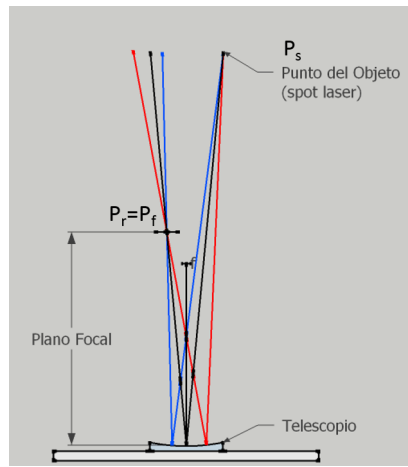


Figura A.4.2: Esquema en 2D (no en escala) para mayor simplificación del trazado de rayos, donde se observa el primer rayo lanzado (en negro), y 2 más aleatorios, todos pasando por el punto de focalización ya obtenido.

Aquí se puede ver que todos los rayos que parten de P_s pasarán por el punto de focalización (P_f), calculado en el paso anterior, por lo que se obtiene la forma de obtener un punto P_r del vector reflejado $\vec{V}_r$.

Ahora, para obtener las coordenadas de los fotones **a la altura de la fibra óptica**, se plantea las ecuaciones de los rayos reflejados (ec. A.4.2), con las siguientes condiciones:

$$\begin{cases} P_s &= (x_s, y_s, z_s) \\ P_t &= (x_t, y_t, z_t) \\ P_r &= (x_f, y_f, z_f) \end{cases} \quad (\text{A.4.7})$$

donde todas las coordenadas son datos. Planteando las ecuaciones de los rayos reflejados con estos valores:

$$\begin{cases} \vec{d}_r &= P_r - P_t = (x_f, y_f, z_f) - (x_t, y_t, z_t) = (x_f - x_t, y_f - y_t, z_f - z_t) \\ \vec{v}_r &= P_t + \lambda_r \vec{d}_r = (x_t, y_t, z_t) + \lambda_r (x_f - x_t, y_f - y_t, z_f - z_t) \end{cases} \quad (\text{A.4.8})$$

por lo tanto:

$$\begin{cases} x_r &= x_t + \lambda_r(x_f - x_t) \\ y_r &= y_t + \lambda_r(y_f - y_t) \\ z_r &= z_t + \lambda_r(z_f - z_t) \end{cases} \quad (\text{A.4.9})$$

y como se desea obtener las coordenadas en el plano de la fibra óptica, $z_r = z_{fo}$. También, por simplificación, se puede definir $z_t = 0$ sin mayor error. Se obtiene entonces:

$$\lambda_r = \frac{z_{fo}}{z_f} \quad (\text{A.4.10})$$

donde finalmente se obtiene la constante para obtener x_r y y_r a la altura de la fibra óptica (x_{fo}, y_{fo}) .

Este procedimiento se realiza para todos los puntos del *spot* obtenidos aleatoriamente, y para cada altura de análisis del recorrido del pulso láser. A modo de resumen, se muestra en el diagrama A.4.3 los pasos realizados en la simulación.

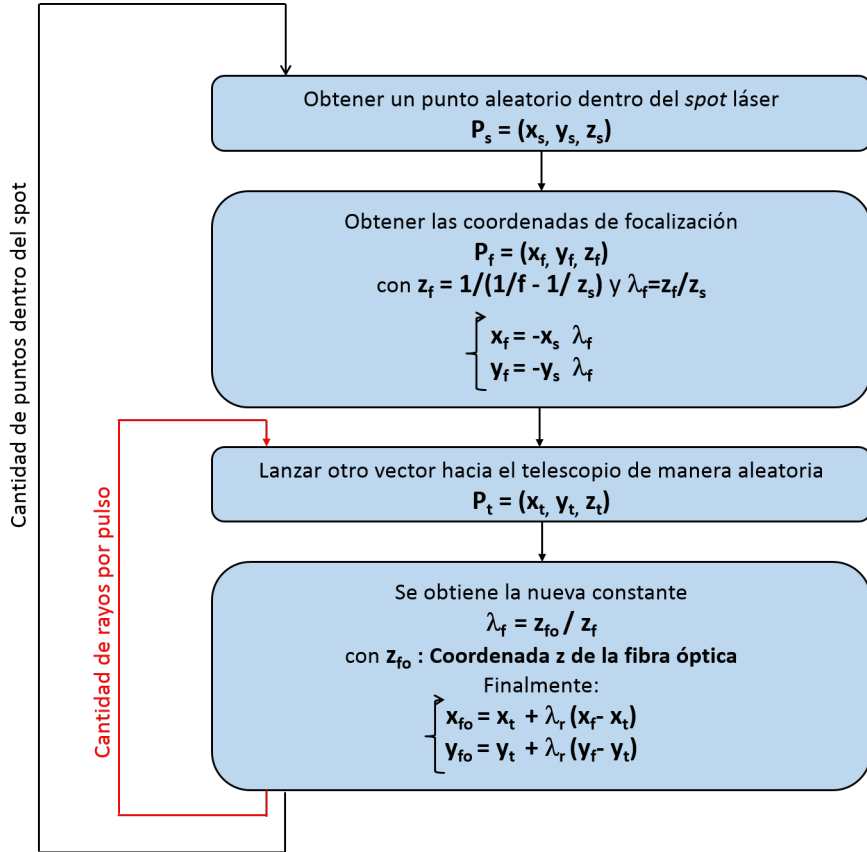


Figura A.4.3: Diagrama de flujo general del algoritmo.

El programa aquí presentado muestra en el panel (2) de la figura A.3.2 una animación de los fotones que llegan a dicho plano, junto con la imagen de la fibra óptica para apreciar el ingreso (o no) a la misma. Al mismo tiempo, se grafica en el panel (1) el factor de *overlap* resultante.

Apéndice B

Comandos de control

B.1. Introducción

Se describen a continuación los 5 comandos que envía la PC de Control a través del proceso **lidarTask**, representado cada uno por sus *headers*. Se acompaña cada uno de ellos con una descripción de su función.

B.2. Comando: *GET***

Ante la recepción de este comando, el microcontrolador responde enviando las variables de estado del sistema. De esta manera, la PC de Control se informa acerca del estado general del lidar. Este comando no posee de ningún parámetro, por lo que consta del *header* seguido de 93 bytes con “*“:

Formato:

*GET***...

Respuesta:

*GET***mbSensorStatus*mbRelaysStatus*iLaserStatus*iLaserTemp*
iLidarStatus*iDecZenithValue*iDecAcimuthValue*...*

Puede observarse que se envían todas las *variables de estado* descritas en la sección anterior. Esta información, es recibida y procesada por **lidarTask**, para luego ser compartida con **adq. lidarTask** envía este comando cada 1 segundo al microprocesador, para mantener actualizado el estado del lidar. Este mecanismo será descrito detalladamente en la sección 5.4.2.

B.3. Comando: *SET***

Configura el estado de un relé (ON/OFF). La estructura del comando es:

Formato:

*SET***numero_de_rele*estado*...*

Donde:

numero_de_rele: Indica el número del relé a controlar, según la conexión indicada en la tabla 5.3.4 del Capítulo 5.

estado: Estado a setear en el relé. Es un string de 3 bytes, los cuales pueden ser: “*ON” o “OFF”. Éstos se traducirán en “1” o “0” en la variable **mbSensorStatus**.

Respuesta:

SETok*...***

La respuesta consta simplemente de un *handshake* para indicarle a **lidarTask** que la tarea fue realizada.

Ante la recepción de este comando, el microcontrolador se encarga de setear el bit correspondiente en la variable **mbRelayStatus**. Luego, la función **RefreshRelay()** es llamada rutinariamente en 2 *co-states* para reflejar el estado de esta variable en la interfaz de salida.

B.4. Comando: *MOTOR*

Mediante este comando es posible girar un determinado motor (de auto-alineación o escaneo) la cantidad de pasos en la dirección indicada en los parámetros. Debido a que tanto los motores de auto-alineación de los telescopios (2 motores por cada uno) o escaneo (1 motor de escaneo cenital y otro acimutal), la información necesaria para moverlos es la misma: **habilitación**, **dirección** y **pasos**. Esto simplifica la operación del sistema, haciendo que solo exista un comando para cualquiera de ellos. Su formato es:

Formato:

MOTOR*tel_scan*motor*dir*pasos*...

Donde:

tel_scan: Número que indica si se trata de un motor de auto-alineación o de escaneo. Valores comprendidos entre 0-5 indican el índice de telescopio el cual se va alinear. El orden el cual están enumerados es en base a la Figura 4.2.3 del Capítulo 4. En caso de adoptar el valor 6, se trata de algún motor de escaneo.

motor: Selecciona el motor a mover, en base a la selección del parámetro anterior. Una vez definido si se trata de un motor de auto-alineación o escaneo con el parámetro **tel_scan**, quedan por definir cual de los 2 motores se va a mover (seleccionados por este parámetro como 0 o 1).

dir: Dirección del motor.

pasos: Cantidad de pasos, la cual se traducirá en cantidad de pulsos a enviar al *driver* correspondiente del motor.

Respuesta:

MOTOR*OK*...

Al igual que el comando ***SET*****, la respuesta de este comando consta simplemente de un *handshake* para indicarle a **lidarTask** que la tarea fue decodificada.

Para la administración de la acción correspondientes, se llama a la función **MoveMotor(...)**, la cual se encarga de generar las señales para mover a los motores: **habilitación**, **dirección** y **pasos** hacia el correspondiente *driver*. Mientras que las señales de **dirección** y **pasos** son las mismas para todos los *drivers*, la señal de **habilitación** es generada por un demultiplexor (ver Capítulo 4, sección 4.3.3.5). Las entradas de este chip son alimentadas por el número del motor a través de las primeras 4 líneas del puerto A (**PA0-PA3**), lo que generará la señal de habilitación de los 14 *drivers*. La dirección del motor es obtenida por medio de los parámetros **tel_scan** y **motor**, utilizando la siguiente fórmula:

$$2 * \text{tel_scan} + \text{motor}$$

En la tabla B.4.1 se listan los diferentes valores que pueden tomar estas variables, junto con la dirección del motor que a sacar por los pines **PA0-PA3**:

tel_scan	motor	Número de motor (PA0-PA3)	Motor
0-5	0-1	0-11	Motores de telescopios para autoalineación
6	0	12	Motor de escaneo cenital
	1	13	Motor de escaneo acimutal

Cuadro B.4.1: Direccionamiento de los motores del lidar.

B.5. Comando: *LASER*

Envía por el puerto serie el comando del láser, el cual es enviado a continuación de este *header*.

Formato:

LASER*comando_del_laser*...

Donde:

comando_del_laser: es un string ASCII el cual sigue los lineamientos indicados en el manual del láser Inlite II-50. No es la intención de este texto abordar sobre los detalles de este protocolo, ya que se encuentra documentado en su hoja de datos. La función del microcontrolador es simplemente hacer de intermediario entre el proceso **lidarTask** y el láser, recibiendo el comando vía WiFi para reenviarlo al láser por medio del puerto serie y retransmitir la respuesta. El procesamiento de la misma estará a cargo de **lidarTask**, interpretando y respondiendo en consecuencia.

B.6. Comando: *END***

Finaliza la conexión con la PC, quedando a la espera de una nueva. Como se comentó anteriormente, ésta conexión es realizada en el *co-state* 3, por lo que mientras se espera una nueva conexión con **lidarTask**, el microprocesador seguirá procesando las demás tareas, programadas en los siguientes *co-states*.

Formato:

*END***. . .*

Respuesta:

*END***. . .*

Apéndice C

Propiedades del error RMS en el procedimiento de detección de zonas moleculares

C.1. Introducción

En el capítulo 7 sección 7.2, se desarrolló un método de detección de zonas moleculares dentro de la señal lidar. El mismo se basa en aproximar la señal lidar elástica medida con una señal lidar molecular pura por medio de una regresión lineal simple (ecuación 7.2.5).

Se realiza en este apéndice el desarrollo matemático del error cuadrático medio, el cual permite obtener las conclusiones del método en la detección de las zonas moleculares.

C.2. Análisis del error cuadrático medio de la regresión lineal simple. Detección de zona molecular

Se realiza en esta sección el desarrollo matemático del error RMS para la evaluación de las zonas moleculares en la señal lidar elástica medida. Esto permite obtener conclusiones importantes que definen las zonas moleculares.

Se parte de la ecuación 7.2.5 del capítulo 7 sección 7.2, donde se plantea la aproximación de una señal lidar molecular pura a una señal medida por medio de una regresión lineal simple:

$$\frac{d}{da} \sum_r^{r+\Delta r} \left[\left(S^{el}(r) - a * S^m(r) \right)^2 \right] = 0$$

en donde la constante de proporcionalidad a que reduce el error RMS entre ambas señales se obtiene por la expresión (ecuación 7.2.6 del capítulo 7):

$$a(r, r + \Delta r) = \frac{\sum_r^{r+\Delta r} [S^{el}(r) \cdot S^m(r)]}{\sum_r^{r+\Delta r} [(S^m(r))^2]}$$

las expresiones de $S^{el}(r)$ y $S^m(r)$ son las señales lidar elástica medida y molecular pura corregidas en rango (ecuaciones 7.2.1 y 7.2.3 del capítulo 7).

$$\begin{cases} S^{el}(r) &= K_i \cdot [\beta^m(r) + \beta^p(r)] \cdot T_m^2(r) \cdot T_p^2(r) + \delta P(r) \cdot r^2 \\ S^m(r) &= \beta^m(r) \cdot T_m^2(r) \end{cases}$$

donde por simplicidad, se reemplazaron las transmisiones aerosólica y molecular por $T_x(r) = e^{-\int_0^r \alpha^x(r) dr}$.

Una vez calculado el factor de proporcionalidad a para una posición de ventana $[r; (r + \Delta r)]$, se obtiene la expresión del error RMS asociado a esa posición como (ecuación 7.2.7):

$$ErrRMS(r, r + \Delta r) = \frac{\sum_r^{r+\Delta r} [S^{el}(r) - a \cdot S^m(r)]^2}{\Delta r} \quad (C.2.1)$$

Reemplazando el $S^{el}(r)$ y $S^m(r)$ en C.2.1:

$$ErrRMS(r, r + \Delta r) = \frac{1}{\Delta r} \sum_r^{r+\Delta r} [K_i \cdot (\beta^m(r) + \beta^p(r)) \cdot T_m^2(r) \cdot T_p^2(r) + \delta P(r) \cdot r^2 - a \cdot \beta^m(r) \cdot T_m^2(r)]^2$$

distribuyendo el paréntesis $(\beta^m(r) + \beta^p(r))$

$$\frac{1}{\Delta r} \sum_r^{r+\Delta r} [K_i \cdot \beta^m(r) \cdot T_m^2(r) \cdot T_p^2(r) + K_i \cdot \beta^p(r) \cdot T_m^2(r) \cdot T_p^2(r) + \delta P(r) \cdot r^2 - a \cdot \beta^m(r) \cdot T_m^2(r)]^2$$

reordenando por medio del factor común $\beta^m(r) \cdot T_m^2(r)$, se obtiene la expresión del error RMS para la posición de ventana $[r; (r + \Delta r)]$:

$$\frac{1}{\Delta r} \sum_r^{r+\Delta r} [\beta^m(r) \cdot T_m^2(r) \cdot (K_i \cdot T_p^2(r) - a) + K_i \cdot \beta^p(r) \cdot T_m^2(r) \cdot T_p^2(r) + \delta P(r) \cdot r^2]^2 \quad (C.2.2)$$

en donde queda en evidencia el rol de cada parámetro en el error, siendo dependiente de la condición aerosólica en la posición de la ventana y el ruido corregido en rango. Finalmente, la posición de la ventana $[r; (r + \Delta r)]$ que obtenga el menor error RMS es marcado como zona libre de aerosoles. El motivo de esto surge del análisis detallado de la ecuación C.2.2, la cual **será mínima cuando la ventana de escaneo Δr se ubique en el rango molecular puro más bajo del rango analizado**. Esto es debido a:

- $a = K_i \cdot T_p^2(r) \implies$ ya que $T_p(r)$ es constante en zona molecular por $\alpha^p(r) = 0$, y la transmisión queda formada por el aporte aerosólico en zonas más bajas.
- $\beta^p(r) = 0 \implies$ por estar en zona molecular.

por lo que el error RMS (ecuación C.2.2) queda en función del ruido de la señal lidar corregida en rango ($\delta P(r) \cdot r^2$):

$$ErrRMS(r, r + \Delta r) = \frac{1}{\Delta r} \sum_r^{r+\Delta r} [\delta P(r) \cdot r^2]^2$$

esta última expresión nos indica que será menor para el rango más bajo (menor $[r; (r + \Delta r)]$) de la zona molecular analizada. En los casos que la ventana no se encuentre en una zona puramente molecular, su error RMS será mayor por estar formado por todos los términos que se observan en la ecuación C.2.2.

Con este desarrollo queda demostrado la capacidad del método para poder detectar las zonas moleculares, comenzando desde las más bajas y continuando hacia las altas en los sucesivos barridos.

C.3. Falsos positivos del método

Se define a los falsos positivos del método cuando, luego de un escaneo con la ventana Δr , se definen zonas moleculares en rangos que no lo son, o cuando el rango molecular obtenido saltea una zona molecular anterior. Estos problemas se pueden deber a una mala elección de la ventana de escaneo Δr o a una inhomogeneidad muy débil en una señal con mucho ruido. Ambos errores tienen diferentes niveles de gravedad en el resultado final, resultando siendo ambos de fácil solución.

En la figura C.3.1 se observa una simulación de la señal lidar elástica de 532 nm con una inhomogeneidad a los 6 km aproximadamente, junto con la aproximación de la señal molecular pura utilizando una ventana de exploración Δr que no cumple con los requerimientos del método por ser demasiado grande.

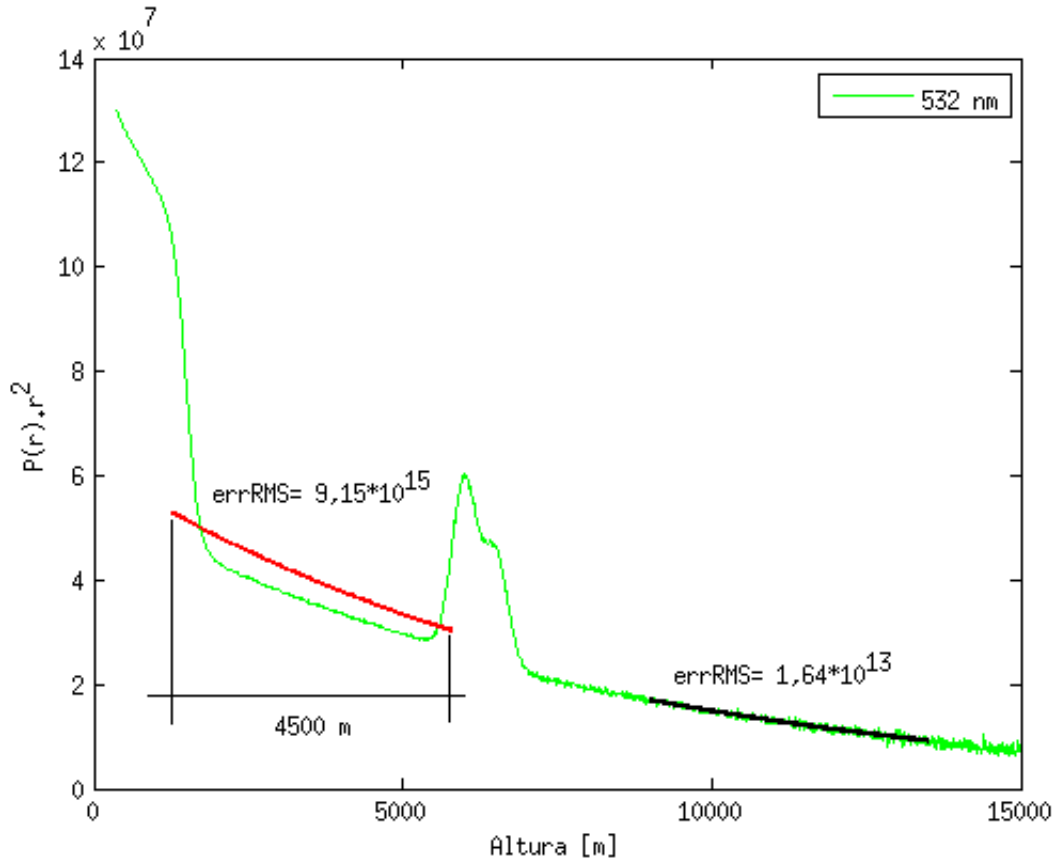


Figura C.3.1: Ejemplo de una mala elección del ancho de la ventana de exploración utilizada.

Como se describió en el capítulo 7, la única condición que debe cumplir Δr es que sea menor a la diferencia entre dos zonas aerosólicas (en caso que exista más de una). En este ejemplo, $\Delta r = 4500m$, la cual es mayor a la diferencia entre la capa límite atmosférica y la inhomogeneidad, imposibilitando la detección de la zona molecular que se encuentra entre ambas. Esto no significa que no exista un ajuste de la señal lidar molecular pura ($S^m(r)$) que minimice el error en la posición de análisis (línea roja). En este caso, en los extremos de la ventana Δr en el *fiteo* representado con color rojo no se ajusta al perfil molecular correctamente debido a que en los extremos ingresan a las zonas inhomogéneas. Este problema es solucionado reduciendo el ancho de la ventana Δr .

Otro error que se puede cometer en el método es cuando una zona aerosólica sea marcada como molecular. Este caso sólo puede suceder bajo la situación en que la inhomogeneidad sea muy débil frente al ruido de la señal. Esto se observa en la ecuación C.2.2, en donde se puede deducir que para que se cumpla este error se debe cumplir con la condición:

$$\sum_{r_a}^{r_a+\Delta r} \left[\beta^m(r) \cdot T_m^2(r) \cdot (K_i \cdot T_p^2(r) - a) + K_i \cdot \beta^p(r) \cdot T_m^2(r) \cdot T_p^2(r) + \delta P(r) \cdot r^2 \right]^2 < \sum_{r_m}^{r_m+\Delta r} [\delta P(r) \cdot r^2]^2 \quad (\text{C.3.1})$$

donde:

r_a : rango inhomogéneo de la señal lidar. Esto significa que $[r_a; (r_a + \Delta r)]$ involucra zonas que contengan aerosoles o nubes.

r_m : rango puramente molecular.

Como fué descrito en la sección anterior, para rangos moleculares el error se minimiza quedando solo función del ruido en el entorno $[r_a; (r_a + \Delta r)]$, mientras que en zonas inhomogéneas queda en función de la condición atmosférica y la constante de instrumental K_i .

No es la intención de realizar un análisis numérico para diferentes casos en los que se cumpla con esta última condición. De todas maneras, se puede deducir cualitativamente que este caso de falso positivo es difícil que suceda. Como se observa en la relación C.3.1, es poco probable que la sumatoria de la izquierda sea menor que la de la derecha. Esto es debido a que, como se desarrolló en la sección anterior, el *fiteo* en zona molecular (factor derecho de la desigualdad) sólo se tiene el error cuadrático medio del ruido de la señal corregido en rango, mientras que en la zona aerosólica (factor izquierdo de la desigualdad) no se eliminan los componentes atmosféricos de la ecuación lidar, como tampoco su constante de instrumental.

Apéndice D

Error relativo del filtrado de la señal lidar. Demostración matemática de su característica invariante con el rango

D.1. Introducción

En el capítulo 7 sección 7.4.1 se comparó el error relativo de las señales lidar antes y después de su filtrado. En los gráficos de las figuras 7.4.4 y 7.4.9 se observa el error relativo de las señales filtradas, en donde se destaca su característica constante en zonas libres de aerosoles. En este apéndice se desarrollará la demostración matemática de esta particular característica.

D.2. Desarrollo

Reescribiendo la expresión del error:

$$Error\ Relativo = \frac{\Delta P(r)}{\overline{P(r)}} \quad (D.2.1)$$

con:

$$\begin{cases} \Delta P(r) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\overline{P(r)} - P_i(r))^2}{N}} \\ \overline{P(r)} = \frac{\sum_{j=1}^N P_j(r)}{N} \end{cases}$$

Analizando $P_i(r)$, $\overline{P(r)}$ y $\Delta P(r)$ en sus expresiones filtradas en zonas moleculares, se tiene:

$$\begin{cases} P_i(r) = c.P^m(r) \\ \overline{P(r)} = \frac{\sum_{j=1}^N c_j.P^m(r)}{N} = P^m(r) \frac{\sum_{j=1}^N c_j}{N} = P^m(r).C \end{cases} \quad (\text{D.2.2})$$

con $C = \frac{\sum_{j=1}^N c_j}{N}$, siendo constante a lo largo de z para las zonas moleculares.

Por lo que introduciendo las expresiones del set de ecuaciones [D.2.2](#) en la expresión del error relativo de la ecuación [D.2.1](#) se obtiene:

$$\frac{\Delta P(r)}{\overline{P(r)}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P^m(z).C - c_i.P^m(z))^2}}{P^m(z).C}$$

introduciendo $P^m(z).C$ del denominador en la raíz cuadrada del numerador:

$$\frac{\Delta P(r)}{\overline{P(r)}} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N (P^m(r).C - c_i.P^m(r))^2}{(P^m(r).C)^2}}$$

y dentro de la sumatoria:

$$\frac{\Delta P(r)}{\overline{P(r)}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{P^m(r).C - c_i.P^m(r)}{P^m(r).C} \right)^2}$$

simplificando:

$$\frac{\Delta P(r)}{\overline{P(r)}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{P^m(r).C}{P^m(r).C} - \frac{c_i.P^m(r)}{P^m(r).C} \right)^2}$$

se obtiene la expresión:

$$\frac{\Delta P(r)}{\overline{P(r)}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(1 - \frac{c_i}{C} \right)^2}$$

Se comprueba de esta manera que el error relativo de la señal lidar filtrada con el método planteado en el capítulo [7](#) es constante en zonas moleculares. Esta es una característica muy buena, ya que es de esperar que el error aumente con el rango en las señales lidar, incluyendo las señales filtradas por métodos convencionales (ver figuras [7.4.4](#) y [7.4.9](#)).