UNIVERSIDAD DE ALCALÁ

Escuela Politécnica Superior

INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

Trabajo Fin de Carrera

"Enlace de Comunicaciones Ópticas Aire-Tierra basado en Retromodulador"

Alberto Carrasco Casado
2008

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ
Escuela Politécnica Superior

Trabajo Fin de Carrera

Enlace de Comunicaciones Ópticas Aire-Tierra basado en Retromodulador

Ingeniería de Telecomunicación

Autor: Alberto Carrasco Casado

Directores: Almudena López Dorado
José Manuel Otón Sánchez

TRIBUNAL:

Presidente: José Luis Lázaro Galilea

Vocal 1º: Óscar Esteban Martínez

Vocal 2º: Almudena López Dorado

CALIFICACIÓN: .....

FECHA: .....

RESUMEN:

En este proyecto se analiza e implementa un enlace descendente de comunicaciones ópticas basado en terminal remoto aéreo-estación base terrena. La estación base actúa como receptor y en ella se sitúa la fuente láser que incide sobre el terminal remoto que actúa como transmisor. El retromodulador, a bordo del transmisor, se encarga de modular mediante pantallas de cristal líquido la señal del láser incidente, tras reflejarla hacia la misma dirección de llegada. La modulación consiste en inducir distintos retardos de fase en las distintas componentes del campo eléctrico de la señal láser con el objetivo de obtener diferentes estados de polarización a modo de símbolos en los que codificar información.

PALABRAS CLAVE:

Retromodulador, Cristal líquido, Polarización, Comunicaciones ópticas, Comunicaciones inalámbricas.

Guía la brillante luz a través de la oscuridad circundante, ¡guíame tú para seguir!
La noche es oscura y estoy lejos de casa... Guíame tu para seguir.
Despierta y brilla, porque tu luz está aquí.
La luz es conocimiento, la luz es vida, la luz es luz.

Chris Stevens, Cicely (1993)

Índice

ÍNDICE ..... **I**

ACRÓNIMOS ..... **V**

SÍMBOLOS ..... **VI**

1. INTRODUCCIÓN **1**

1.1. COMUNICACIONES NO GUIADAS 2
1.1.1. Reseña histórica *2*
1.1.2. Ventajas/inconvenientes de las comunicaciones no guiadas *4*
1.2. COMUNICACIONES ÓPTICAS NO GUIADAS 5
1.2.1. Reseña histórica *6*
1.2.2. Ventajas e inconvenientes de las CC.OO. no guiadas *9*
1.3. COMUNICACIONES BASADAS EN RETROMODULADOR 11
1.3.1. Retrorreflector *11*
1.3.2. Principio de funcionamiento *13*
1.3.3. Tipos de retromodulación *14*
1.4. RESUMEN DEL TRABAJO REALIZADO 16

2. POLARIZACIÓN DE LA LUZ **19**

2.1. INTRODUCCIÓN 20
2.1.1. Estado de polarización *21*
2.1.2. Elipse de polarización *21*
2.2. DESCRIPCIÓN MATRICIAL DE LA POLARIZACIÓN 22
2.2.1. Álgebra de Jones *22*
2.2.2. Parámetros de Stokes *23*
2.2.3. El vector de Stokes y el álgebra de Mueller *24*
2.3. ESFERA DE POINCARÉ 25
2.3.1. Algunos ejemplos *27*
2.4. ELEMENTOS MODIFICADORES DEL SOP 29
2.5. CRISTALES LÍQUIDOS 30

3. SIMULACIONES CASO IDEAL **33**

3.1. MODELO DE UNA PANTALLA DE CRISTAL LÍQUIDO 34
3.1.1. Introducción *34*
3.1.2. Modelo matricial *34*
3.2. MODELO DE UN RETROMODULADOR 36
3.2.1. Modelo de un retrorreflector *36*
3.2.2. Conjunto retrorreflector + pantalla cristal líquido *37*
3.3. MODULACIONES EN AMPLITUD 38
3.3.1. OOK *38*
3.3.2. M-ASK *40*
3.4. MODULACIONES DEL SOP CON UN CL 41
3.4.1. SOPs lineales *42*
3.4.2. SOPs elípticos *44*
3.5. MODULACIONES DEL SOP CON 2 CL INDEPENDIENTES 44
3.5.1. Esquema de dos CL y polarizador *45*
3.5.2. Esquema de dos CL sin polarizador *48*
3.6. DETECTOR DEL SOP 50
3.7. CONCLUSIONES 51

4. SIMULACIONES CASO GENERAL 53

4.1. ÁNGULO DE CONO DISTINTO A 90º 53
4.1.1. Esquema de dos CL y polarizador 54
4.1.2. Esquema de dos CL sin polarizador 55
4.1.3. Sin polarizador y con diferente alineamiento entre células 56
4.2. MODELO AMPLIADO DEL CL 58
4.2.1. Montaje para la caracterización de las células de CL 58
4.2.2. Procedimiento para la caracterización 59
4.2.3. Resultados de la caracterización 60
4.2.4. Simulaciones con el modelo ampliado y con polarizador 62
4.2.5. Simulaciones con el modelo completo y sin polarizador 64
4.3. RETRORREFLECTOR EN MOVIMIENTO 65
4.3.1. Movimiento del vector director de la molécula de CL 66
4.3.2. Cambios de ejes de coordenadas y operaciones vectoriales 67
4.3.3. Influencia de las variaciones angulares en el retromodulador 69
4.3.4. Álgebra de Jones 71
4.4. RESULTADOS FINALES DE LAS SIMULACIONES 72
4.4.1. Elección del desalineamiento ζ entre células en función de γ 72
4.4.2. Elección del desalineamiento ζ entre células en función de Φ_0 73
4.4.3. Influencia conjunta de los ángulos γ y φ_0 74
4.5. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES SOBRE EL DISEÑO 76

5. DESARROLLO DEL RETROMODULADOR Y RESULTADOS EXPERIMENTALES 79

5.1. CÉLULAS DE CRISTAL LÍQUIDO 80
5.1.1. Proceso de fabricación 80
5.1.2. Consideraciones de diseño 82
5.1.3. Ensamblaje de las dos células 84
5.2. CONTROL DE TEMPERATURA DE LAS PANTALLAS DE CL 84
5.2.1. Circuito de medición de la temperatura 85
5.2.2. Sistema calentador de las células de CL 87
5.3. PLACAS DE CIRCUITO IMPRESO 89
5.3.1. Fotodetectores y amplificadores 89
5.3.2. Diagramas de las placas 90
5.4. MONTAJE E INTEGRACIÓN DEL SISTEMA 92
5.4.1. Retrorreflector 92
5.4.2. Soporte estructural del retromodulador 93
5.4.3. Equipo de control y adquisición 94
5.4.4. Comunicación retromodulador-CompactRIO 96
5.4.5. Sistema completo 98
5.5. RESULTADOS EXPERIMENTALES 100
5.5.1. Equipo utilizado en las pruebas 100
5.5.2. Montaje experimental 101
5.5.3. Resultados de las pruebas 102
5.5.4. Análisis de los resultados 107

6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS 109

6.1. CONCLUSIONES 109
6.2. LÍNEAS FUTURAS 111

APÉNDICE I: LISTADOS MAPLE 113

I.1. MODULACIÓN DE AMPLITUD OOK 113
I.2. MODULACIÓN DE AMPLITUD M-ASK 114
I.3. MODULACIÓN DE SOPS LINEALES CON UN CL 115
I.4. MODULACIÓN DE SOPS ELÍPTICOS CON UN CL 116
I.5. MODULACIÓN DE SOPS CON DOS CL Y POLARIZADOR 117
I.6. MODULACIÓN DE SOPS CON DOS CL SIN POLARIZADOR 118
I.7. DETECTOR DEL SOP 118
I.8. MODULACIÓN DE SOPS CON DOS CL Y POLARIZADOR (ÁNGULO DE CONO DISTINTO DE 90º) 119
I.9. MODULACIÓN DE SOPS CON DOS CL SIN POLARIZADOR (ÁNGULO DE CONO DE 75º) 120
I.10. MODULACIÓN DE SOPS CON DOS CL SIN POLARIZADOR (ÁNGULO DE CONO DE 75º Y Z DE 65º) 121

I.11. MODULACIÓN DE SOPS CON DOS CL CON POLARIZADOR (MODELO AMPLIADO DE CL W212) 122
I.12. MODULACIÓN DE SOPS CON DOS CL SIN POLARIZADOR (MODELO AMPLIADO DE CL W212) 123
I.13. CONVERSOR JONES-MUELLER 124
I.14. RETROMODULADOR REAL COMPLETO 124
I.15. RETROMODULADOR REAL COMPLETO (SIMULACIONES DE Γ O Φ_0 VARIABLE) 126
I.16. RETROMODULADOR REAL COMPLETO (SIMULACIONES DE Γ VARIABLE PARA UN Φ_0 DETERMINADO) 128
I.17. RETROMODULADOR REAL COMPLETO (SIMULACIONES DE Γ Y Φ_0 VARIABLE) 131

APÉNDICE II: RESULTADOS FINALES DE LAS SIMULACIONES 135

II.1. Γ VARIABLE Y CÉLULAS ALINEADAS A 0^o 136
II.2. Γ VARIABLE Y CÉLULAS ALINEADAS A 30^o 137
II.3. Γ VARIABLE Y CÉLULAS ALINEADAS A 60^o 138
II.4. Γ VARIABLE Y CÉLULAS ALINEADAS A 90^o 139
II.5. Φ_0 VARIABLE Y CÉLULAS ALINEADAS A 0^o Y $\Gamma=30^o$ 140
II.6. Φ_0 VARIABLE Y CÉLULAS ALINEADAS A 30^o Y $\Gamma=30^o$ 141
II.7. Φ_0 VARIABLE Y CÉLULAS ALINEADAS A 60^o Y $\Gamma=30^o$ 142
II.8. Φ_0 VARIABLE Y CÉLULAS ALINEADAS A 90^o Y $\Gamma=30^o$ 143
II.9. Γ VARIABLE PARA $\Phi_0=0$ 144
II.10. Γ VARIABLE PARA $\Phi_0=\Pi/2$ 145
II.11. Γ VARIABLE PARA $\Phi_0=\Pi$ 146
II.12. Γ VARIABLE PARA $\Phi_0=3\Pi/2$ 147
II.13. Φ_0 Y Γ VARIABLES 148

BIBLIOGRAFÍA 149

Acrónimos

Acrónimo	Español	Inglés
APD	Fotodiodo de avalancha	Avalanche Photo-Diode
ASK	Modulación por cambios de amplitud	Amplitud Shift Keying
BER	Tasa de error binaria	Bit Error Rate
CCOO	Comunicaciones Ópticas	
CL	Cristal líquido	
DOP	Grado de polarización	Degree Of Polarization
FPGA		Field Programmable Gate Array
GND	Tierra	Ground
ITO	Óxido de estaño e indio	Indium Tin Oxide
LCD	Pantalla de cristal líquido	Liquid Cristal Display
MEMS	Sistema microelectromecánico	Micro Electro Mechanical System
MQW	Pozo cuántico múltiple	Multiple Quantum Well
OOK	Modulación de apagado encendido	On Off Keying
PCB	Placa de circuito impreso	Printed Circuit Board
Pol45	Polarizador lineal a 45º	
PolHor	Polarizador horizontal	
PVD	Deposición por evaporación	Physical Vapor Deposition
RET	Retardador	
RM	Retromodulador	
ROT	Rotador	
ROTy	Rotador según eje y	
ROTz	Rotador según eje z	
RR	Retrorreflector	
RTD	Detector de temperatura resistivo	Resistance Temperature Detector
SmV	Esméctico con respuesta en V	V-Shape Smectic
SOP	Estado de polarización	State Of Polarization
VAN	Nemático de alineamiento vertical	Vertically Aligned Nematic

Símbolos

Símbolo	Significado
d	Grosor de una célula de CL
D	Diámetro de un telescopio
E	Campo eléctrico
I	Irradiancia
$\vec{k}$	Vector director unitario de un haz incidente
M	Número de símbolos
$\vec{n}$	Vector director unitario de una molécula de CL
n	Índice de refracción
$\mathbf{n_e}$	Índice de refracción extraordinario
$\mathbf{n_{eff}}$	Índice de refracción eficaz
$\mathbf{n_o}$	Índice de refracción ordinario
$\mathbf{R_0}$	Resistencia de referencia de un PT100
$\mathbf{R_{RTD}}$	Resistencia de salida de un RTD
$\mathbf{S_0, S_1, S_2, S_3}$	Parámetros de Stokes
T	Temperatura
$\mathbf{T_b}$	Tasa binaria
V	Tensión
$\mathbf{V_{máx}}$	Tensión máxima
α	Coeficiente de temperatura de un PT100
β(V)	Movimiento fuera del plano de una molécula de CL
δ	Desfase de un retardador
Δn	Diferencia de índices de refracción
γ	Ángulo cenital del retromodulador
ε	Excentricidad de una elipse
ζ	Ángulo de alineamiento entre células de CL
Θ	Límite de difracción de un telescopio
θ	Ángulo entre $\vec{k}$ y $\vec{n}$
λ	Longitud de onda
ν	Frecuencia óptica
ω	Frecuencia angular
φ	Giro de un rotador
φ(V)	Movimiento dentro del plano de una molécula de CL
$\boldsymbol{\varphi_0}$	Orientación del retromodulador sobre su eje
χ	Ángulo de semicono

1. Introducción

Las telecomunicaciones inalámbricas han conocido en los últimos años una explosión sin igual. Desde las redes globales de telefonía móvil hasta los enlaces vía satélite, las comunicaciones sin cables han traído consigo una enorme cantidad de nuevos servicios y suponen uno de los principales pilares de la actual Sociedad de la Información. En particular las comunicaciones ópticas en espacio libre [1], pese a su reciente aparición, proporcionan una serie de ventajas que las colocan como sucesoras de las tradicionales comunicaciones por microondas en determinados escenarios como las comunicaciones vía satélite en general o los enlaces en espacio profundo en particular [2].

En este proyecto se aborda la posibilidad de usar las frecuencias ópticas como estrategia para el diseño de un nuevo tipo de transmisor basado en retromodulador, cuyos principales atractivos son eliminar la necesidad del sistema de apuntamiento y de la fuente láser en uno de los terminales. La aplicación óptima de estas características se encuentra en el uso del sistema retromodulador a bordo de un terminal remoto en vuelo, por ejemplo un dirigible o un satélite, de un enlace de comunicaciones ópticas en espacio libre. La fuente láser y el sistema de apuntamiento quedarían confinados al terminal terrestre.

En un terminal remoto la eliminación del láser y del sistema de apuntamiento trae consigo un considerable ahorro en términos de peso y volumen, así como de potencia consumida por el subsistema de comunicaciones. En un enlace inalámbrico del tipo terminal remoto-terminal local siempre es deseable liberar al terminal remoto de complejidad traspasándola en la medida de lo posible al terminal local, donde supone una dificultad mucho menor por la disponibilidad de recursos.

Este capítulo se dedica a hacer una breve introducción a las disciplinas en las que se enmarca el presente proyecto, algunos fundamentos teóricos básicos sobre los que se apoya, así como un resumen del trabajo llevado a cabo para la consecución de los objetivos del mismo. En los sucesivos capítulos se abordan los desarrollos teóricos necesarios, las simulaciones del sistema basadas en los mismos y una descripción del desarrollo experimental, así como los resultados obtenidos.

1.1. COMUNICACIONES NO GUIADAS

Se engloba dentro del concepto de comunicaciones en espacio libre, comunicaciones inalámbricas o comunicaciones no guiadas, a aquéllas en las que se hace uso del espacio libre como medio de comunicación existente entre el emisor y el receptor, transfiriendo la información a distancia sin usar cables o cualquier otro tipo de medio de guiado.

Las comunicaciones no guiadas son el segmento de la industria de las telecomunicaciones de más rápido crecimiento en la actualidad [3]. Las redes de telefonía móvil han experimentado un crecimiento exponencial en la última década; actualmente el número de usuarios sobrepasa los dos mil millones. Más recientemente las redes de datos inalámbricas están sustituyendo a las tradicionales redes de cable tanto en hogares como en empresas y grandes organizaciones. La tecnología inalámbrica ha traído una innumerable cantidad de aplicaciones que van más allá de los sistemas de comunicaciones, tales como hogares inteligentes, telemedicina, autopistas automatizadas, etc.

1.1.1. Reseña histórica

Los primeros enlaces de comunicaciones no guiadas datan de épocas prehistóricas, en los que el hombre usaba señales de humo, antorchas, etc. para transmitir alguna información a distancia. Posteriormente se sucedieron un gran número de mejoras basadas en el mismo principio pero hubo que esperar hasta la década de 1860 en que Maxwell postulara las leyes básicas del electromagnetismo y 20 años más tarde Heimrich Hertz demostrara su existencia.

En 1893 Nikola Tesla demuestra por primera vez la transmisión y recepción de energía electromagnética sin cables y en 1901 Marconi realiza la primera comunicación transatlántica mediante ondas de radio (Figura 1-1). Marconi logró transmitir la letra S

mediante código Morse a través de 3360 km de océano, si bien ignorando los principios de la propagación electromagnética y utilizando dispositivos inventados por otros [4]. Desde entonces la tecnología de radio evolucionó rápidamente permitiendo transmisiones a mayores distancias, con mayor calidad, menos potencia y empleando sistemas más pequeños.

Figura 1-1. Recepción de la primera señal transatlántica.

Al principio todas las transmisiones introducían información sobre la portadora modulando su amplitud. No es hasta 1933 que es patentada la radio FM en la que se modula la frecuencia de la señal y en esta década comienzan las transmisiones de TV en Europa y más tarde en Norte América. En la década de 1950 hacen su aparición los transistores que acabarán sustituyendo a las válvulas y una década más tarde comienzan a verse las primeras transmisiones digitales.

En 1957 comienza la era espacial con el lanzamiento del primer satélite artificial por parte de la Unión Soviética (Sputnik 1, Figura 1-2) y con ella las comunicaciones por satélite. Se suceden varios satélites repetidores y en 1962 el Telstar 1 se convierte en el primer satélite en transmitir señales de televisión. El primer satélite geoestacionario fue el Syncom 2 (1963), y el Intelsat 1 (conocido como early bird) fue el primer satélite geoestacionario comercial de comunicaciones. Desde entonces la sucesión de satélites de comunicaciones cada vez más sofisticados fue constante. Cabe señalar que sólo transcurrieron once años entre el lanzamiento del primer satélite artificial y la realización efectiva de un sistema global de comunicaciones por satélite plenamente operacional (Intelsat 3) en 1968 [5].

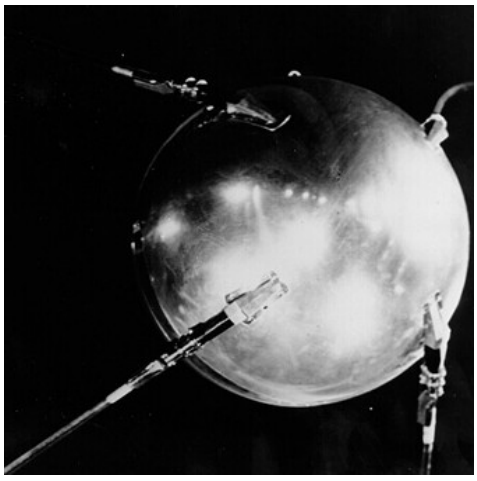


Figura 1-2. Sputnik 1, primer satélite artificial [1].

1.1.2. Ventajas/inconvenientes de las comunicaciones no guiadas

Las comunicaciones no guiadas presentan una serie de importantes ventajas en relación a los sistemas guiados un buen número de aplicaciones. Por una parte, su uso es imprescindible o muy necesario en determinados escenarios en que es imposible o poco práctico el establecimiento de un enlace mediante una conexión física, como un cable. Esto es válido sobre todo cuando los equipos están separados por grandes trechos de agua, escarpadas montañas o inhóspitos desiertos, o al comunicarse con transpondedores alojados en satélites. También es imprescindible el uso de sistemas inalámbricos cuando los terminales son móviles.

Las comunicaciones no guiadas se basan en la transmisión de información modulada en ondas electromagnéticas propagándose en el espacio. Como es bien conocido, el frente de ondas en el que se concentra la potencia va expandiéndose siguiendo la ley del cuadrado de la distancia (Figura 1-3), según la cual la densidad de potencia existente a una determinada distancia desde la fuente es inversamente proporcional al cuadrado de la misma. Este fenómeno trae consigo una importante desventaja en el uso de comunicaciones no guiadas dado que siempre se perderá potencia si ésta no incide en su totalidad sobre la antena receptora.

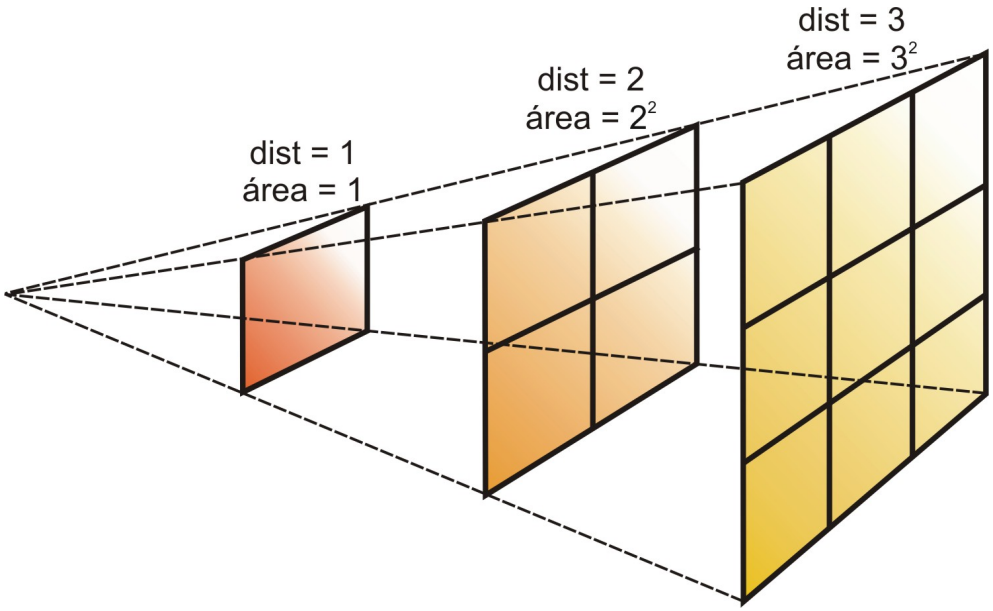


Figura 1-3. Ley del cuadrado de la distancia.

El citado fenómeno de la divergencia de la onda electromagnética depende, para una distancia dada, de dos factores: la longitud de onda y el tamaño de la antena transmisora. A menor longitud de onda y mayor tamaño de antena, la divergencia sufrida por la señal es menor, lo que significa que los enlaces son más directivos. Por ello en enlaces no difusivos interesa siempre elegir una frecuencia alta y/o una antena grande.

La cantidad de información que se puede transmitir en un sistema de comunicación está directamente relacionada con el ancho de banda de la señal modulada

y este ancho de banda viene limitado por la frecuencia de la señal portadora. Al incrementarse ésta, se puede incrementar el ancho de banda transmitido. Debido a la divergencia, en comunicaciones no guiadas se suelen emplear altas frecuencias, lo que a su vez proporciona grandes anchos de banda.

También convine recordar que el medio utilizado es un medio compartido, lo que da lugar a una serie de características que se han de observar. Por una parte, en un medio compartido puede haber muchos enlaces simultáneos, lo que puede dar lugar a interferencias. Este problema se suele solventar realizando una gestión del espectro electromagnético en diferentes bandas. Además de otros sistemas de comunicaciones, existe ruido de muchos tipos que se añade a la señal recibida, haciéndola más difícilmente distinguible. Y por último, cuando el medio de transmisión es la atmósfera existen fenómenos tales como la absorción, el *scattering*, lluvia, nubes, etc. que afectan al enlace en una medida u otra según varios factores como la longitud de onda, el emplazamiento, etc.

En la Tabla 1-1 se presenta un resumen de las ventajas e inconvenientes de las comunicaciones no guiadas frente a los sistemas guiados.

Ventajas	Inconvenientes
Da cobertura a lugares remotos.	Pérdida de potencia por divergencia de la onda con la distancia.
Permite terminales móviles.	Interferencias.
Grandes anchos de banda en enlaces directivos.	Ruido.

Tabla 1-1. Ventajas e inconvenientes de las comunicaciones no guiadas frente a las comunicaciones guiadas.

1.2. COMUNICACIONES ÓPTICAS NO GUIADAS

Los sistemas actuales de comunicación utilizan una onda electromagnética sobre la que se superpone la información que se desea transmitir. A esta señal que no contiene información útil se le conoce como portadora y la técnica habitual consiste en la modulación de la portadora mediante una señal de información. Una vez que la señal se ha propagado hasta su destino, se extrae la información de ésta a través de un proceso de demodulación.

Cuando la frecuencia de la señal portadora cae dentro del rango de frecuencias visibles por el ojo humano o cercano a ellas, al tipo de comunicaciones que resulta del empleo de estas frecuencias se le conoce como comunicaciones ópticas. La banda propia de las comunicaciones ópticas (Figura 1-4) se extiende desde el infrarrojo próximo ($\nu = 3 \cdot 10^{13}$ Hz) hasta el ultravioleta próximo ($\nu = 1{,}5 \cdot 10^{15}$ Hz).

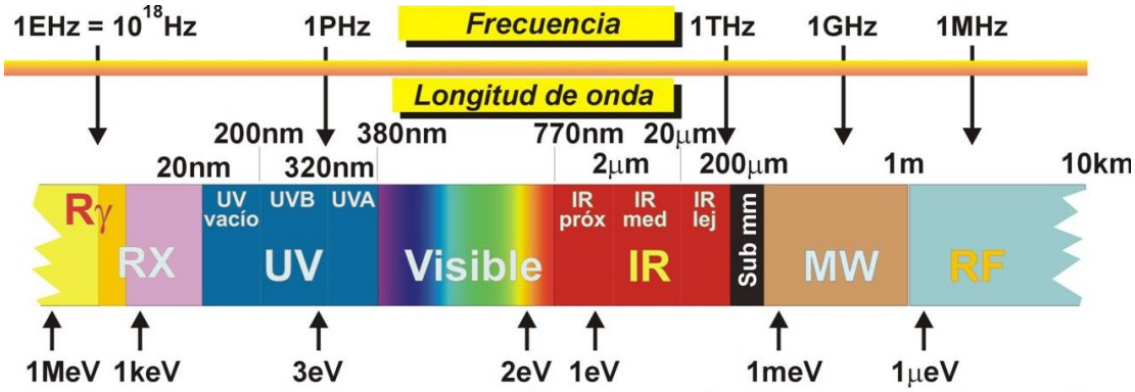


Figura 1-4. Espectro electromagnético (no a escala).

A diferencia de las comunicaciones ópticas guiadas en las que las señales ópticas son conducidas a través de un camino establecido en el interior de fibras ópticas, las comunicaciones ópticas no guiadas constituyen el tipo de comunicación en el que se usan portadoras a frecuencias ópticas desplazándose en un medio libre, como puede ser la atmósfera, el mar o el vacío.

1.2.1. Reseña histórica

Los orígenes de las comunicaciones ópticas no guiadas coinciden con el origen de las comunicaciones ópticas mismas. Desde épocas prehistóricas el hombre ha usado señales ópticas para comunicarse, si bien esta comunicación consistía en muy poca información y cubría muy cortos alcances. Las comunicaciones ópticas no guiadas al menos cuentan con cerca de tres milenios de historia ya que ha sido verificado [7] el empleo sobre el 800 A.C. de señales ópticas creadas con fuego para transmitir información formada por un limitado número de mensajes conocidos previamente por ambas partes.

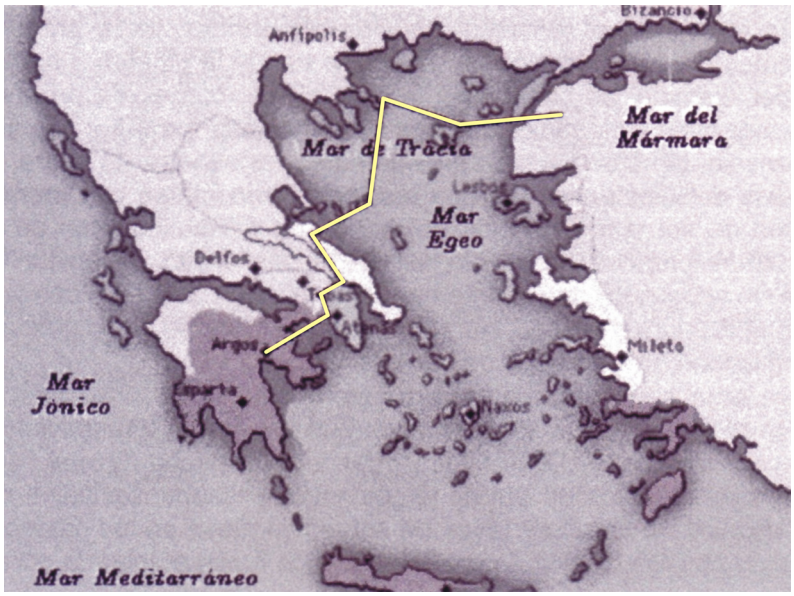


Figura 1-5. Trazado de la transmisión de señales luminosas entre Troya y Atenas, de acuerdo con lo escrito por Esquilo [6].

A caballo entre la realidad histórica y la mitología, varios siglos antes pudo llevarse a cabo el enlace de comunicaciones que el poeta griego Esquilo describe en su obra Agamenón (primera de la trilogía conocida como la Orestiada). En esta obra el autor, por boca de la reina Clitemnestra, cuenta la forma por la que ésta ha tenido noticia en Atenas de la caída de Troya. A lo largo de más de sesenta versos va describiendo minuciosamente el paso de una señal luminosa que se había ido propagando por medio de ocho hogueras sucesivas situadas en la cima de montes consecutivos desde donde existe línea de visión directa con los adyacentes, situados a distancias de entre veinte y cien kilómetros unos de otros (Figura 1-5). Lo destacable de este enlace es la gran distancia cubierta (más de 500 kilómetros) y el primitivo empleo de algunas técnicas modernas tales como la regeneración de señales, el uso de repetidores y la transmisión digital (un bit de información).

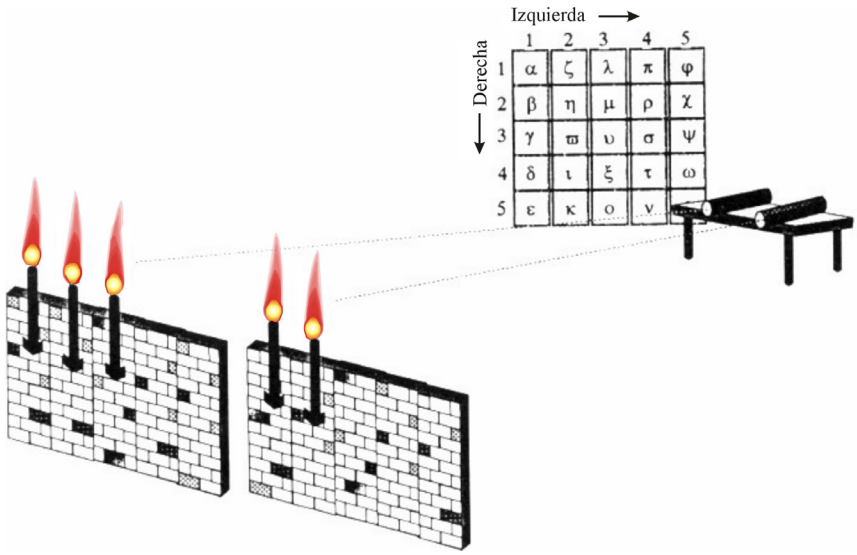


Figura 1-6. Sistema de comunicaciones ópticas de Polibio [7].

Sobre el 200 A.C. el historiador griego Polibio desarrolló un sistema que era capaz de transmitir letras en lugar de mensajes fijos. El funcionamiento se basaba en una tabla de códigos como la de la Figura 1-6. En función del número de antorchas que hubiera encendidas a la derecha y a la izquierda, se seleccionaba una letra determinada. Con operadores entrenados se lograba una comunicación de unas ocho letras por minuto.

El avance de las comunicaciones ópticas prácticamente se detuvo hasta el siglo XVII con el desarrollo del telescopio. En 1791 se dio un gran paso con la invención del primer telégrafo (que fue óptico, no eléctrico) por parte de Claude Chappe. Consistía en un mástil fijo que soportaba dos piezas móviles con las que se podían adaptar una gran cantidad de configuraciones diferentes. La disposición era observada a través de un telescopio por un operador situado en otra estación, actuando de repetidora a la siguiente estación. Este sistema propició la creación de una red de comunicaciones ópticas en Francia que en 1.844 cubría unos 5000 kilómetros con más de 500 estaciones [8].

Aunque este tipo de comunicación tuvo gran éxito en su época, el descubrimiento de la electricidad y el telégrafo eléctrico propició su final.

El telégrafo óptico de Claude Chappe se extendió más adelante a otros países (Suecia, Rusia). En España se inauguró en octubre de 1846 la primera línea de telégrafo óptico Madrid-Irún [9]. Diez años después la red se extendía hasta Valencia, Barcelona, Cádiz y Badajoz (Figura 1-7). El director del proyecto fue el entonces coronel José María Mathé y Aragua, el mismo que se encargó posteriormente de desplegar el telégrafo eléctrico, y que fue el primer director de la Escuela de Telégrafos, embrión de las actuales Escuelas de Telecomunicación. El laboratorio de Comunicaciones Ópticas de la ETSI de Telecomunicación de la U. Politécnica de Madrid se denomina Laboratorio Brigadier Mathé en su honor.

Figura 1-7. Torre de telégrafo óptico y máximo despliegue del telégrafo óptico en España.

El primer sistema de comunicaciones ópticas no guiadas en el sentido actual fue el fotófono, construido por Alexander Graham Bell en 1880 [10], cuatro años después del teléfono. Consistía en un espejo reflector de la luz del Sol que podía ser modulado acústicamente. La señal modulada, después de avanzar unos 200 m, incidía sobre una placa de selenio cuya resistencia eléctrica dependía de la intensidad luminosa que incidiera sobre ella. De esta forma se obtenía una corriente eléctrica que podía ser convertida, mediante un altavoz, en una señal acústica.

En 1916 Albert Einstein presentó su trabajo teórico sobre emisión estimulada de la radiación electromagnética. Hasta entonces se creía que un fotón sólo podía interaccionar con un átomo de dos formas: podía ser absorbido, elevando el átomo a un nivel de energía superior, o podía ser emitido, de forma que el átomo pasase a un nivel inferior. Einstein propuso una tercera posibilidad: que un fotón con energía correspondiente al valor de una transición entre niveles podía estimular que un átomo pasase a un nivel energético inferior, emitiendo otro fotón con idéntica energía que el primero. Este trabajo teórico supuso la base para el posterior desarrollo del láser. Sin embargo, tuvieron que pasar más de 40 años hasta que el primer láser de gas fuese construido. Sólo dos años más tarde, se construyó el primer láser de semiconductor.

Un primer experimento (llevado a cabo por la NASA) de comunicaciones ópticas no guiadas se realizó en 1967 [7] usando un láser de gas CO_2 y técnicas coherentes, y un segundo (por parte de la Fuerza Aérea de los EEUU) empleando un láser Nd:YAG y técnicas de detección directa. Sin embargo los efectos de la atmósfera sobre las señales hicieron decaer el interés en esa época ya que los enlaces quedaban seriamente perjudicados en presencia de lluvia o niebla. En su lugar, en los años posteriores a 1970

se produjo un enorme desarrollo en las fibras ópticas, por lo que las comunicaciones ópticas no guiadas quedaron relegadas a unas pocas aplicaciones muy específicas. De esta manera quedó casi totalmente detenido su desarrollo hasta el resurgimiento en la actualidad de una serie de proyectos que sitúan a las comunicaciones ópticas como una ventajosa alternativa a las radiocomunicaciones no guiadas en una serie de aplicaciones.

1.2.2. Ventajas e inconvenientes de las CC.OO. no guiadas

Las comunicaciones ópticas no guiadas presentan ventajas significativas en relación a los sistemas de microondas en aplicaciones tales como enlaces entre satélites o en espacio profundo. La mejora conseguida con este tipo de enlaces es tanto mayor cuanto mayor sean la capacidad requerida del enlace y la distancia a superar.

Figura 1-8. Figura artística del satélite Artemis comunicándose mediante un láser con el satélite SPOT 4 (proyecto Silex de la ESA) [11].

La principal ventaja proviene del hecho de que a frecuencias ópticas la divergencia del haz es proporcionalmente menor que a frecuencias menores, y por lo tanto también es menor el tamaño del *spot* detectado en el receptor (Figura 1-9). El pequeño tamaño de *spot* se traduce en un gran aumento de la densidad de potencia recibida, consiguiéndose así una importante mejora en las prestaciones del sistema. Esta gran ventaja también se traduce en la necesidad de disponer de un sistema de apuntamiento extremadamente preciso.

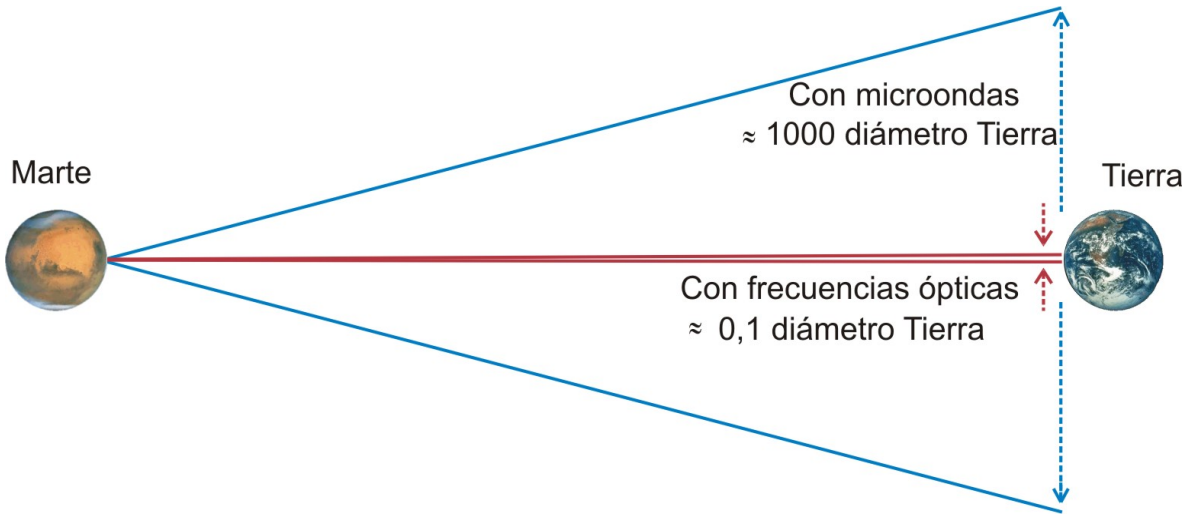


Figura 1-9. Divergencia de un haz de frecuencias ópticas y de microondas en un enlace Marte-Tierra.

Otra consecuencia de la menor longitud de onda de la señal portadora es que son necesarias antenas (telescopios) de menor tamaño que a frecuencias de microondas para obtener las mismas ganancias. A esto se le suma el hecho de que los equipos son más ligeros y pequeños que los empleados en microondas (alrededor de un 60% más pequeños [12]). Esta reducción de carga supone una gran ventaja económica en el caso de situarlos a bordo de satélites o naves espaciales donde cada kilogramo de más eleva considerablemente el presupuesto necesario.

En comunicaciones por fibra óptica, el empleo de las fuentes y detectores ópticos viene impuesto por las limitaciones de la propia fibra. En comunicaciones ópticas no guiadas se dispone de un rango más amplio de elección, aunque hay que señalar que si el medio de propagación incluye la atmósfera, ésta también impondrá limitaciones en la longitud de onda.

Frente a las virtudes de los sistemas ópticos no guiados comentadas, hay que mencionar también algún inconveniente. El principal lo constituye la atmósfera terrestre, que provoca determinados efectos indeseados en las señales ópticas, deteriorando las prestaciones del enlace, y en ciertas condiciones bloqueándolo por completo. Dejando aparte el efecto de la absorción (que se puede minimizar haciéndose despreciable con una correcta elección de la longitud de onda) las turbulencias atmosféricas consiguen que, al distorsionar el frente de ondas por variaciones aleatorias en el índice de refracción, la intensidad y fase de la señal recibida en el telescopio fluctúen.

En la Tabla 1-2 se presenta un resumen de las principales ventajas e inconvenientes de las comunicaciones ópticas no guiadas frente a los clásicos sistemas no guiados de microondas.

Ventajas	Inconvenientes
Ancho de banda mucho mayor.	Los efectos de la atmósfera degradan y hasta pueden llegar a bloquear el enlace óptico.
Elevada potencia recibida respecto a la transmitida debido a la pequeña divergencia del haz óptico.	Necesidad de un sistema de apuntamiento muy preciso debido al estrecho haz óptico.
Elevadas ganancias de transmisión y recepción con tamaños de antenas (telescopios) muy pequeños.	Elevado ruido recibido junto a la señal óptica.
Terminales transmisores y receptores más ligeros y pequeños.	Poco apropiadas para difusión debido al estrecho haz óptico.
Explota una parte del espectro electromagnético no usada.	Posible riesgo de radiación.

Tabla 1-2. Ventajas e inconvenientes de las comunicaciones ópticas no guiadas frente a los sistemas no guiados de microondas.

1.3. COMUNICACIONES BASADAS EN RETROMODULADOR

La comunicación basada en el uso de un retromodulador, también conocida como retrocomunicación [13], es una nueva técnica que consiste en la modulación de un haz incidente desde un láser situado en el otro extremo del enlace y su reflexión en las caras de un retrorreflector.

1.3.1. Retrorreflector

Un retrorreflector es un dispositivo óptico diseñado de forma que permita llevar a cabo la reflexión de un frente de ondas a lo largo de un vector que es paralelo al incidente pero de sentido contrario. Su comportamiento es diferente al de un espejo, ya que éste solo actuaría del modo descrito si el frente de ondas fuera exactamente perpendicular al espejo. El retrorreflector refleja el frente de ondas hacia la dirección de llegada sea cual sea el ángulo de incidencia.

Hay tres tipos de retrorreflectores:

- Los más comunes son los llamados ojos de gato, típicamente formados por una superficie esférica transparente en la entrada/salida y otra reflexiva al fondo.
- Una forma mucho menos común por su complejidad y necesidad de muy alta potencia se basa en el fenómeno óptico no lineal de conjugación de fase.

- Finalmente, el tipo de retrorreflectores de interés para este proyecto es el de esquina de cubo, formado por tres superficies reflexivas mutuamente perpendiculares. Este tipo de retrorreflector puede verse en dos variedades:
    - En la más común (Figura 1-10) la esquina se obtiene directamente trucando un material transparente y haciendo reflexivas las caras externas.
    - La otra variedad se consigue alineando perpendicularmente tres espejos.

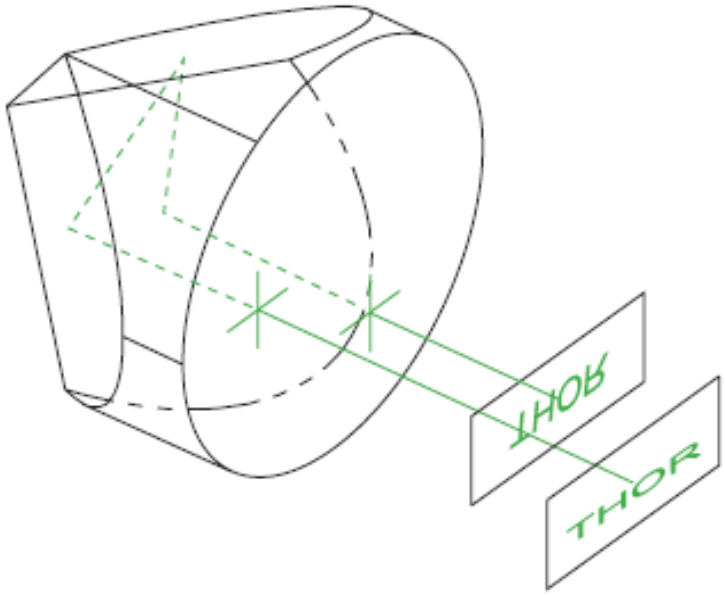


Figura 1-10. Funcionamiento de un Retrorreflector de esquina de cubo (Imagen de ThorLabs Inc).

Los retrorreflectores permiten ser usados en un buen número de diferentes aplicaciones. Los de tipo ojo de gato se emplean comúnmente en superficies cuya visibilidad se desea aumentar sin recurrir a elementos activos, tales como carreteras, señales viales, vehículos o prendas de vestir. De esta manera se aprovecha la luz incidente sobre el objeto para hacerlo visible en la dirección de la que proviene la fuente. Para grandes distancias los retrorreflectores tipo esquina de cubo ofrecen mejores resultados. Como ejemplos de aplicaciones a tales distancias cabe destacar los retrorreflectores dejados en la superficie de la Luna en la misión Apollo XI para realizar medidas de la distancia Tierra-Luna [14], el proyecto RIS (Retroreflector In Space), en el que se mide en Tierra el camino de ida y vuelta para caracterizar el canal atmosférico [15], o los satélites Lageos 1 y 2 (Figura 1-11), que son esferas de 0,6 metros cubiertas por 426 retrorreflectores tipo esquina de cubo y proporcionan órbitas de referencia para estudios geodinámicos de la Tierra [16]. Finalmente, la aplicación de interés para este proyecto son las comunicaciones y su principio de funcionamiento se introduce en el siguiente apartado.

Figura 1-11. Satélite LAGEOS 1 formado por 426 retrorreflectores de esquina de cubo.

1.3.2. Principio de funcionamiento

Tal como se muestra en la Figura 1-12, el funcionamiento de un retromodulador se basa en llevar a cabo la modulación de la luz que entra al retrorreflector y sale posteriormente. Como consecuencia de las características ópticas del retrorreflector, a partir de un haz láser de entrada sin modular, el retromodulador puede devolver una señal modulada independientemente del ángulo de entrada que tenga ésta (siempre y cuando quede dentro del campo de visión del retrorreflector). Por lo tanto es un elemento estático alojado en el terminal remoto (que se supone móvil), cayendo la responsabilidad del apuntamiento en el terminal terrestre, sea éste fijo o también en movimiento. Como también corresponde al terminal terrestre la generación de la fuente láser, el retromodulador únicamente se encargará de llevar a cabo la modulación, tarea ésta poco exigente en términos de potencia consumida.

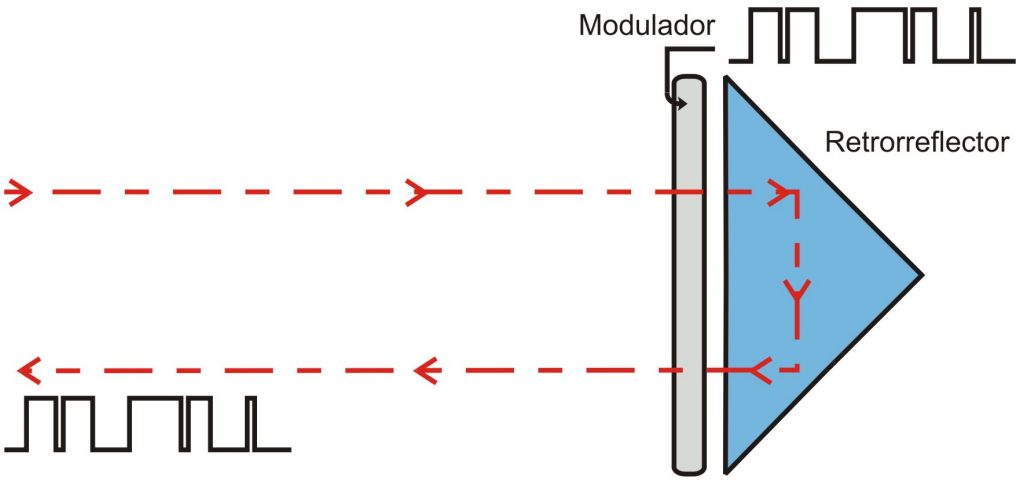


Figura 1-12. Principio de funcionamiento de retromodulación.

Conviene destacar que, dado que el modulador se coloca entre el canal y el retrorreflector, la señal necesariamente se verá doblemente afectada por la modulación (a la entrada y a la salida), aspecto que habrá que tener en consideración. No obstante, como se estudiará más adelante, existen estrategias para conseguir que la señal realice un solo paso eficaz a través del modulador.

1.3.3. Tipos de retromodulación

Se han demostrado hasta el momento tres diferentes técnicas para llevar a cabo la modulación de la señal incidente en un retromodulador:

1.3.3.a. Sistemas electromecánicos

La tecnología MEMS (MicroElectroMechanical System, o sistemas microelectromecánicos en español) se basa en la integración de elementos mecánicos y electrónicos sobre un substrato de silicio mediante técnicas de microfabricación. Con esta tecnología se pueden conseguir retromoduladores de intensidad (Figura 1-13) o de fase. Los de fase permiten el uso de receptores heterodinos idealmente más sensibles que los basados en detección directa de intensidad, y habiendo sido demostradas tasas de bit de menos de 1 kbps [17], con un potencial de varios kbps en distancias relativamente cortas (200-400 m).

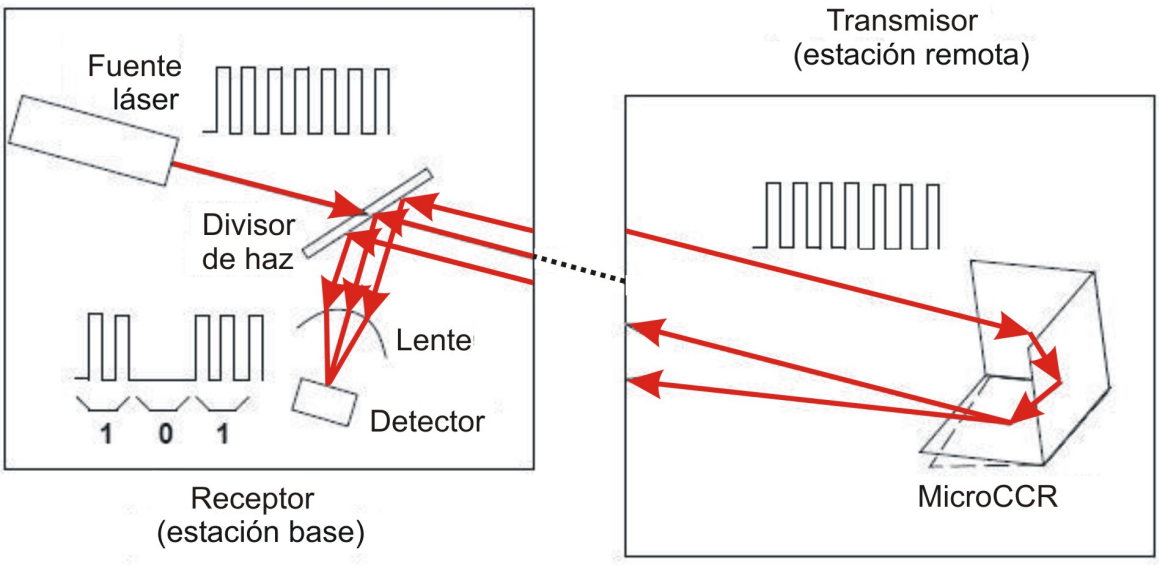


Figura 1-13. Sistema retromodulador basado en micro retrorreflectores de esquina de cubo y detección directa [18].

Estos retromoduladores presentan un bajo consumo y coste, así como un diseño muy compacto. Sin embargo, tienen el inconveniente de alcanzar muy bajas tasas binarias y pequeños ángulos de visión, si bien el ángulo puede aumentarse arbitrariamente empleando *arrays* de retromoduladores (con el consiguiente aumento de masa) en cualquiera de los tres tipos vistos.

1.3.3.b. Electroabsorción

Los moduladores de electroabsorción basados en MQW (Multiple Quantum Wells, o en español, múltiple pozo cuántico) son dispositivos de semiconductor que se fabrican mediante la técnica de epitaxia de haces moleculares, lo que permite crecer capas extremadamente delgadas sobre grandes superficies (del orden de cm^2). Alternando diferentes capas de semiconductor las propiedades ópticas se pueden modificar las propiedades ópticas a una determinada longitud de onda que depende de los materiales utilizados en la fabricación. De esta manera se obtiene un modulador de muy alta velocidad (se han probado en sistemas de fibra óptica a frecuencias de decenas de GHz [19]) controlado por tensiones de algunos voltios que modifican la absorción que encuentra la luz a su paso (Figura 1-14). Esto hace cambiar la transmitancia del material, ofreciendo la posibilidad de llevar a cabo una modulación OOK de alta tasa binaria.

Empleando retromoduladores de electroabsorción como los descritos pueden conseguirse altas velocidades de transferencia (se han demostrado tasas binarias del orden de Mbps en enlaces de corta distancia) manteniendo un consumo muy bajo de potencia. También presentan un diseño mecánicamente robusto, con el inconveniente de suponer un alto coste.

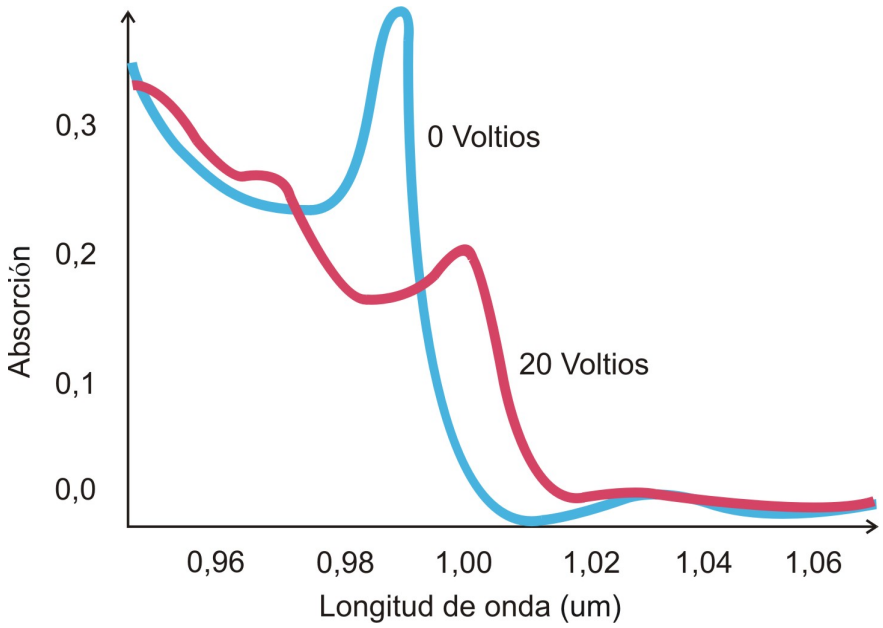


Figura 1-14. Variación de la absorción con la tensión en función de la longitud de onda en un retromodulador de electroabsorción [20].

1.3.3.c. Cristales líquidos

Los cristales líquidos son materiales ópticamente anisótropos que poseen una alta birrefringencia lineal que les permite comportarse como retardadores lineales de fase de un haz de luz que los atraviese. Aplicando un campo eléctrico entre las paredes que confinan el cristal líquido en una célula, dicha birrefringencia puede modificarse en dirección o magnitud, respecto a un haz incidente con una polarización determinada, aplicando un campo eléctrico entre las paredes que confinan el cristal líquido de la

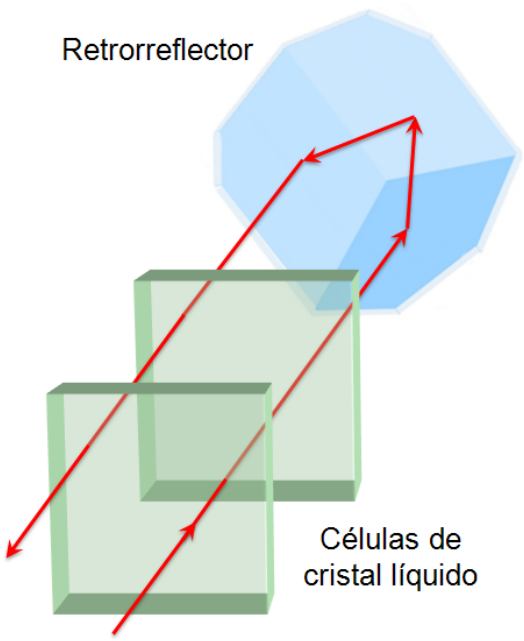


Figura 1-15. Esquema de un retromodulador basado en CL.

célula. Dependiendo del material, una pantalla de cristal líquido puede emplearse como un modulador digital o analógico, -capaz de introducir cualquier retardo de fase deseado.

Se ha usado esta propiedad para llevar a cabo modulaciones de amplitud OOK [21 y 22]. En este proyecto se presenta una nueva técnica de modulación (Figura 1-15) basada en introducir información en los diferentes estados de polarización que se pueden conseguir gracias a la variación del retardo. Como se verá en adelante, esta técnica permite en teoría aumentar arbitrariamente el régimen binario trasladando de nuevo al receptor de la estación base la dificultad de la distinción entre los diferentes estados de polarización.

Los moduladores basados en cristal líquido presentan un consumo muy reducido, así como un peso mínimo. La contrapartida es que su velocidad de conmutación, en los materiales más rápidos, no supera actualmente las decenas de kHz. Otro inconveniente, que comparten con los moduladores MQW, es que el uso habitual de esta tecnología se basa en células muy pequeñas y para el propósito del retromodulador son necesarias grandes células, para lo cual hay que desarrollar nuevas técnicas de fabricación.

1.4. RESUMEN DEL TRABAJO REALIZADO

El proyecto intenta demostrar la nueva técnica de retromodulación del estado de polarización de un haz láser mediante cristales líquidos en un enlace de comunicaciones ópticas en espacio libre. El proyecto se concentrará en el canal de bajada (terminal remoto hacia estación base) debido a la naturaleza de la comunicación basada en retromodulador, si bien un enlace de subida es ciertamente posible empleando alguna técnica de las empleadas habitualmente en comunicaciones ópticas no guiadas.

Para la realización del proyecto será necesaria una primera fase de estudio teórico de los fundamentos de la polarización de la luz y su relación con los cristales líquidos, así como una revisión del estado del arte en lo que respecta a la retrocomunicación. Tras ello se llevará a cabo una fase de simulaciones que partirán del caso ideal en que el sistema es estático hasta un caso general en el que se tendrán en consideración todas las posibles variables relacionadas con el movimiento del terminal remoto. Así mismo se simularán las diferentes configuraciones posibles para el retromodulador en lo

concerniente a los cristales líquidos empleados. Las simulaciones realizadas servirán como base para el diseño del sistema retromodulador y ayudarán en la comprensión de los resultados extraídos de las pruebas experimentales.

Seguidamente se procederá al desarrollo del retromodulador como sistema integrado tras llevar a cabo una serie de pruebas experimentales de sus diferentes partes por separado. En esta fase se implementarán los diferentes subsistemas que componen el dispositivo, tales como el control de la temperatura, las pantallas de cristal líquido, la parte electrónica y todo el montaje estructural.

Por último se presentarán los resultados experimentales obtenidos en las pruebas del enlace completo y se analizarán las conclusiones y posibles líneas futuras a seguir.

2. Polarización de la luz

La luz puede caracterizarse por su intensidad, su longitud de onda y su polarización. La polarización es, pues, una propiedad fundamental de la luz, o de cualquier onda electromagnética en general, y se define como la figura geométrica trazada por el vector del campo eléctrico sobre un plano estacionario y perpendicular a la dirección de propagación a medida que la onda lo atraviesa.

En este capítulo se introducen los conceptos teóricos fundamentales sobre polarización necesarios para la comprensión del principio de funcionamiento del retromodulador. Así mismo se presentan las técnicas que serán posteriormente empleadas en la parte de simulaciones para contar con un tratamiento matemático de la luz en términos de polarización. Por último se revisa el papel de los cristales líquidos como elementos modificadores de la polarización de la luz.

2.1. INTRODUCCIÓN

La luz puede ser tratada como una onda electromagnética transversal. Como se ha dicho, al avanzar ésta en el espacio dibuja una figura en el plano transversal al del desplazamiento. En el caso de que esta figura sea predecible, se dice que la luz está polarizada. En caso contrario en el que no es posible predecir la futura oscilación a partir de la presente, se trata de luz no polarizada.

El vector campo eléctrico de una onda electromagnética transversal puede ser dividido en dos componentes ortogonales E_x y E_y (Figura 2-1), a su vez ortogonales a la dirección de propagación que se pueden expresar como:

$$E_x = E_{0x}\cos(\omega t + \psi_x) \qquad \textbf{(2-1)}$$

$$E_y = E_{0y}\cos(\omega t + \psi_y) \qquad \textbf{(2-2)}$$

donde E_{0x} y E_{0y} son las amplitudes instantáneas, ω la frecuencia angular y ψ_x y ψ_y son las fases instantáneas.

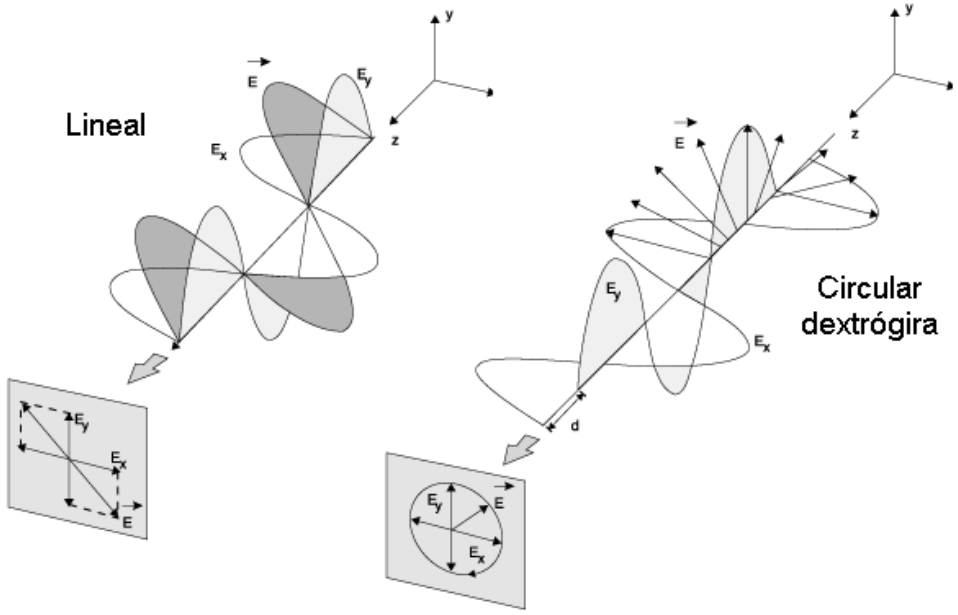


Figura 2-1. Descomposición del campo eléctrico en 2 compententes E_x y E_y que describen una figura al atravesar el plano transversal a la propagación [23].

En el caso general en el que ambas componentes están desfasadas ($\psi_x \neq \psi_y$) y tienen diferentes amplitudes ($E_{0x} \neq E_{0y}$), la figura que dibujan al desplazarse la onda es una elipse. Como casos extremos se encuentran la polarización lineal, cuando las dos componentes están en fase ($\psi_x = \psi_y$) y la circular cuando su desfase es de $\psi_x - \psi_y = \pi/2$ en el caso dextrógiro o $\psi_x - \psi_y = 3\pi/2$ en el levógiro y su amplitud idéntica ($E_{0x} = E_{0y}$).

2.1.1. Estado de polarización

Cada oscilación de la luz tiene lugar en un intervalo del orden de los 10^{-15} segundos (fs), por lo que solo interesa el estado promedio. A este estado se le llama estado de polarización o SOP (State Of Polarization) en adelante.

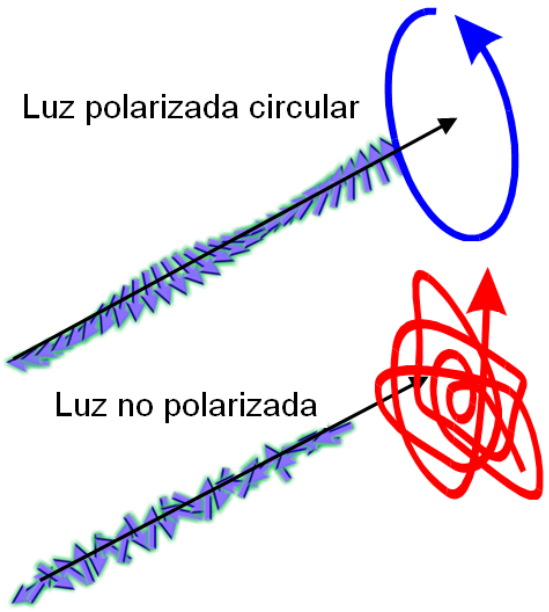


Figura 2-2. Luz polarizada y luz no polarizada.

En la naturaleza la radiación electromagnética se produce a menudo como consecuencia de la aportación de un determinado número de fuentes independientes, cada una con sus propias características. El resultado es que no es posible apreciar un determinado estado de polarización. Sin embargo, es posible describirla como su descomposición en una parte polarizada y otra no polarizada (Figura 2-2). Así, en general la luz contiene componentes polarizadas y no polarizadas y se habla de grado de polarización de la luz para cuantificar cada aportación. Más adelante se ofrecerá una descripción más precisa del concepto de grado de polarización.

2.1.2. Elipse de polarización

Como se ha visto, el campo eléctrico de una onda transversal electromagnética describe una elipse en el plano ortogonal al sentido de propagación. Por lo tanto, es posible defnir completamente un determinado SOP mediante una elipse. Eliminando de las ecuaciones (2-1) y (2-2) el propagador ωt por carecer de información en lo que a la polarización respecta, el campo eléctrico total se puede expresar de la siguiente forma:

$$\frac{E_x^{\,2}}{E_{0x}^{\,2}} + \frac{E_y^{\,2}}{E_{0y}^{\,2}} - 2\frac{E_x E_y}{E_{0x} E_{0y}}\cos(\psi) = \mathrm{sen}^2(\psi) \qquad \textbf{(2-3)}$$

donde $\psi = \psi_y - \psi_x$

La ecuación (2-3) se corresponde con la ecuación de una elipse (Figura 2-3) que forma un ángulo α con el sistema coordenado (E_x, E_y) tal que:

$$\tan(2\alpha) = 2\frac{E_{0x} E_{0y}\cos(\psi)}{E_{0x}^{\,2} - E_{0y}^{\,2}} \qquad \textbf{(2-4)}$$

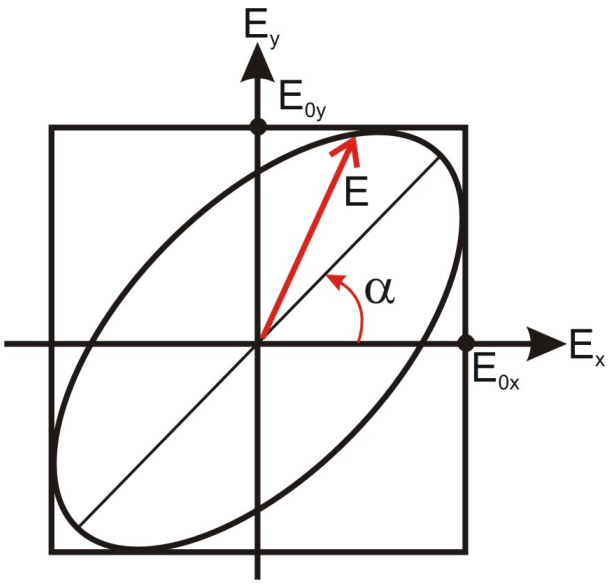


Figura 2-3. Luz elíptica.

2.2. DESCRIPCIÓN MATRICIAL DE LA POLARIZACIÓN

Se ha descrito hasta ahora la luz en términos de campo eléctrico de la onda electromagnética. Claramente sería ventajoso formular una descripción matemática en términos de magnitudes físicas medibles, esto es, la irradiancia, es decir, la potencia lumínica incidente. A continuación se presenta la formulación matricial empleada a lo largo del proyecto y que proporciona una manera simple de tratar la luz y sus elementos modificadores del SOP.

2.2.1. Álgebra de Jones

Si se habla de luz completamente polarizada, cualquier estado de polarización y elemento modificador del SOP puede ser descrito de una forma simple y elegante mediante el álgebra de Jones. La forma más directa de formular matricialmente la luz es mediante el vector de campo eléctrico introducido previamente en función de las dos componentes ortogonales E_x y E_y. De esta forma el vector de Jones de una onda luminosa genérica quedaría de la siguiente forma:

$$\overline{E} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{0x} e^{j\psi_x} \\ E_{0y} e^{j\psi_y} \end{bmatrix} \qquad \textbf{(2-5)}$$

Los elementos modificadores de la polarización se representan en álgebra de Jones con matrices 2×2. El SOP de salida se obtiene multiplicando el SOP de entrada por la matriz de transformación. Cuando hay varios elementos modificadores consecutivos, el SOP de salida se obtiene multiplicando por la izquierda cada nuevo elemento (Figura 2-4).

$$\overline{E}_{sal} = \begin{bmatrix} E_{x\,sal} \\ E_{y\,sal} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} \\ W_{21} & W_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_{x\,ent} \\ E_{y\,ent} \end{bmatrix}$$

Figura 2-4. Cascada de elemento como producto de matrices de Jones.

La ventaja de la formulación matricial de Jones es su simplicidad. Sin embargo, presenta el inconveniente de que no se expresa en términos de magnitudes directamente medibles y únicamente es aplicable a ondas totalmente polarizadas porque no tiene en cuenta las componentes no polarizadas ni los elementos despolarizadores.

2.2.2. Parámetros de Stokes

Mediante los parámetros de Stokes cualquier SOP puede describirse mediante cuatro cantidades que es posible medir en términos de irradiancia. Además permiten su uso con luz completamente polarizada y también con luz parcialmente polarizada. Desarrollando [24] las ecuaciones (2-1) y (2-2) se llega a:

$$S_0^{\,2} \geq S_1^{\,2} + S_2^{\,2} + S_3^{\,2} \qquad \textbf{(2-6)}$$

donde:

$$S_0 = E_{0x}^{\,2} + E_{0y}^{\,2} \qquad \textbf{(2-7)}$$

$$S_1 = E_{0x}^{\,2} - E_{0y}^{\,2} \qquad \textbf{(2-8)}$$

$$S_2 = 2E_{0x}E_{0y}\cos(\psi) \qquad \textbf{(2-9)}$$

$$S_3 = 2E_{0x}E_{0y}\sin(\psi) \qquad \textbf{(2-10)}$$

En estas ecuaciones S_0 es la irradiancia total y S_1, S_2 y S_3 especifican el SOP. Por ello en la ecuación (2-6) ambos términos de la fórmula serían iguales solo en el caso de que la luz estuviera completamente polarizada. En otro caso el primer término sería siempre mayor que el segundo. S_1 refleja una tendencia hacia polarización lineal horizontal si $S_1 > 0$ o hacia la vertical si $S_1 < 0$. S_2 tiende a asemejarse a un estado lineal a 45º si $S_2 > 0$ y a -45º si $S_2 < 0$. Por último S_3 revela una tendencia hacia tener sentido a derechas si $S_3 > 0$ o a izquierdas si $S_3 < 0$.

La principal ventaja de los parámetros de Stokes es que se pueden calcular a partir de cantidades físicas directamente medibles:

$$S_0 = 2I_0 \quad \textbf{(2-11)}$$

$$S_1 = 2I_1 - 2I_0 \quad \textbf{(2-12)}$$

$$S_2 = 2I_2 - 2I_0 \quad \textbf{(2-13)}$$

$$S_3 = 2I_3 - 2I_0 \quad \textbf{(2-14)}$$

Según las anteriores ecuaciones, cada uno de los cuatro parámetros de Stokes se obtiene como consecuencia de medir la irradiancia de la luz que atraviesa un filtro (diferente por cada uno de los parámetros de Stokes). Todos los filtros hacen que la mitad de la luz pase descartando la otra mitad:

- El filtro usado para medir I_0 es uno isótropo que deja pasar los SOP sin alterar.
- Los empleados para la medición de I_1 y I_2 son ambos polarizadores lineales cuyos ejes de transmisión están alineados en horizontal y a 45º respectivamente.
- Por último el filtro utilizado para I_3 es un polarizador circular dextrógiro.

2.2.3. El vector de Stokes y el álgebra de Mueller

Para poder trabajar matricialmente con los parámetros de Stokes, es posible formularlos en forma de vector de la siguiente manera:

$$\overline{S} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad \textbf{(2-15)}$$

Una vez visto el vector de Stokes puede presentarse matemáticamente el concepto de grado de polarización DOP (del inglés Degree Of Polarization) introducido anteriormente.

$$DOP = \frac{\sqrt{S_1^{\,2} + S_2^{\,2} + S_3^{\,2}}}{S_0} \quad \textbf{(2-16)}$$

Por ejemplo, el vector de Stokes $\begin{bmatrix} 4 & 2 & 0 & 3 \end{bmatrix}$ tendría un grado de polarización del 90%, lo que significa que tendría componentes no polarizadas debido al hecho de que la irradiancia total S_0 es mayor que la suma cuadrática de los parámetros de Stokes que describen el SOP $\sqrt{S_1^{\,2} + S_2^{\,2} + S_3^{\,2}}$, es decir, $4 > 3{,}6$.

El álgebra de Mueller es un método de matrices diseñado para trabajar con los vectores de Stokes, que sí consideran la luz parcialmente polarizada a diferencia de la formulación de Jones. Las matrices de Mueller se aplican de forma muy parecida a las de Jones con la diferencia de que son de dimensión 4×4. Así, el paso de un haz a través de un elemento modificador del SOP genérico M quedaría:

$$\overline{S}' = M \cdot \overline{S} \Rightarrow \begin{bmatrix} S_0' \\ S_1' \\ S_2' \\ S_3' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \qquad \textbf{(2-17)}$$

La matriz M de 4×4 de la ecuación (2-17) es conocida como matriz de Mueller y actúa como matriz de transformación entre el vector de entrada $\overline{S}$ y el de salida $\overline{S}'$.

2.3. ESFERA DE POINCARÉ

Como se ha visto, una combinación dada de parámetros de Stokes S_1, S_2 y S_3 especifican unívocamente un SOP determinado. Dado que son parámetros ortogonales, se pueden usar para representar los ejes x, y y z de una esfera, que tiene como ecuación general:

$$1 = m^2 + c^2 + s^2 \qquad \textbf{(2-18)}$$

Normalizando los parámetros de Stokes con S_0 para conseguir igualar las ecuaciones (2-6) y (2-18), cualquier SOP, representado como una combinación de S_1, S_2 y S_3, quedaría situado en algún punto sobre o por el interior de la superficie de una esfera de radio unidad, conocida como esfera de Poincaré. Conviene destacar que la situación de un SOP en el interior de la esfera de radio unidad representa que la luz no está completamente polarizada. En ningún caso simboliza una disminución de la potencia de la luz respecto al mismo SOP en la superficie.

De esta manera se consigue de una forma muy simple visualizar todos los SOPs posibles y de trabajar con ellos. Como se puede apreciar en la Figura 2-5, el plano formado por S_1 y S_2 contiene todas las polarizaciones lineales de forma que cualquier luz lineal sea cual sea su orientación estará en algún punto del ecuador de la esfera. En los polos se sitúan los dos SOPs circulares. Cualquier otro punto daría lugar a una luz elíptica, cuya orientación dependerá de lo cerca que esté de cada uno de los cuatro SOPs lineales extremos del ecuador y su sentido de giro del hemisferio en el que se encuentre. El centro de la esfera representa la luz completamente despolarizada.

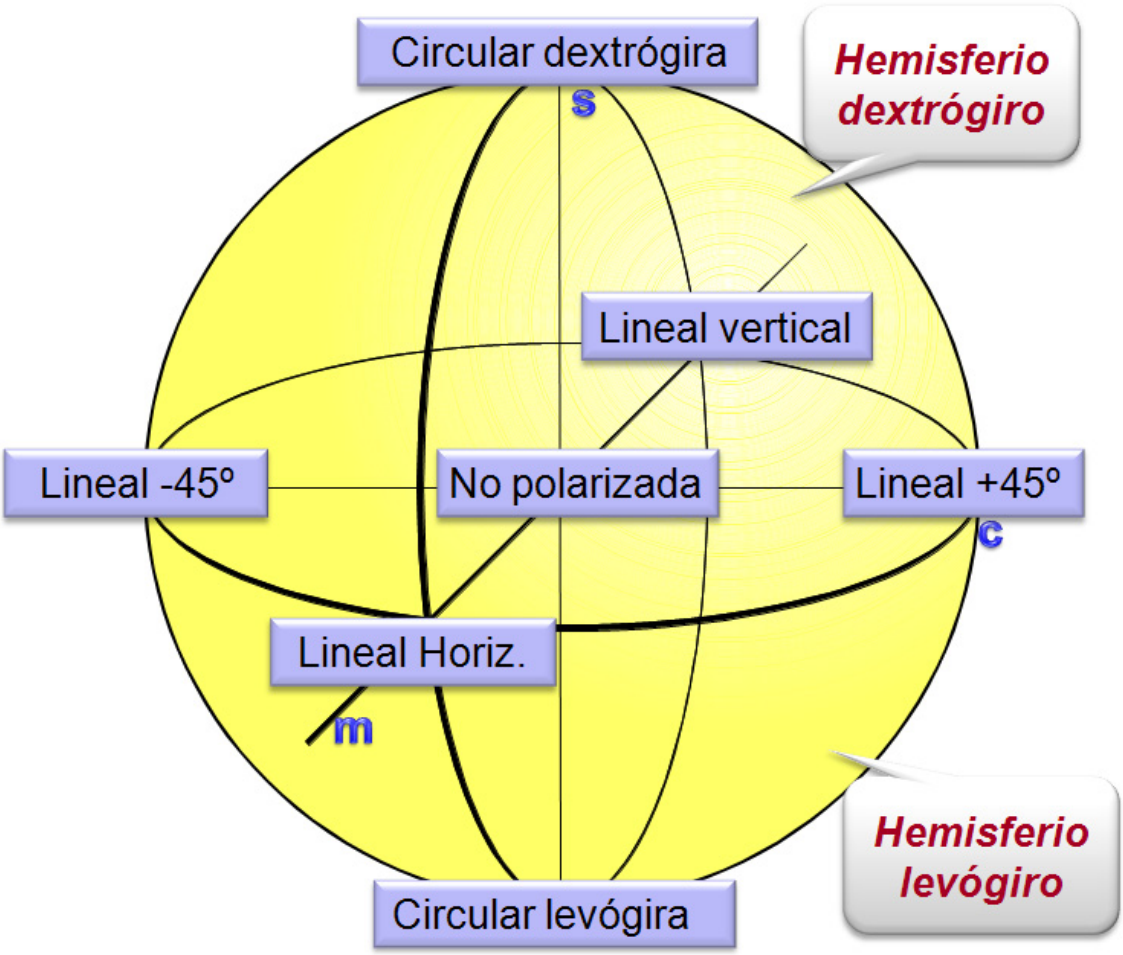


Figura 2-5. Esfera de Poincaré

Una forma alternativa de expresar un determinado SOP es mediante la pareja azimut o longitud θ y elevación o latitud ε, que pueden calcularse a partir de los parámetros normalizados de Stokes de la siguiente manera:

$$m = \cos 2\varepsilon \cos 2\theta \qquad \textbf{(2-19)}$$

$$c = \cos 2\varepsilon \,\mathrm{sen}\, 2\theta \qquad \textbf{(2-20)}$$

$$s = \mathrm{sen}\, 2\varepsilon \qquad \textbf{(2-21)}$$

Con esta notación los diferentes SOPs se pueden ver de la siguiente forma: Los puntos a lo largo de un mismo paralelo representan estados elípticos de idéntica excentricidad pero con diferentes orientaciones determinadas por el azimut. Y los puntos situados en un mismo meridiano representan la misma orientación para diferentes excentricidades de la elipse, pasando desde una polarización dextrógira en el polo norte, cambiando su sentido en el ecuador y llegando hasta la levógira en el sur.

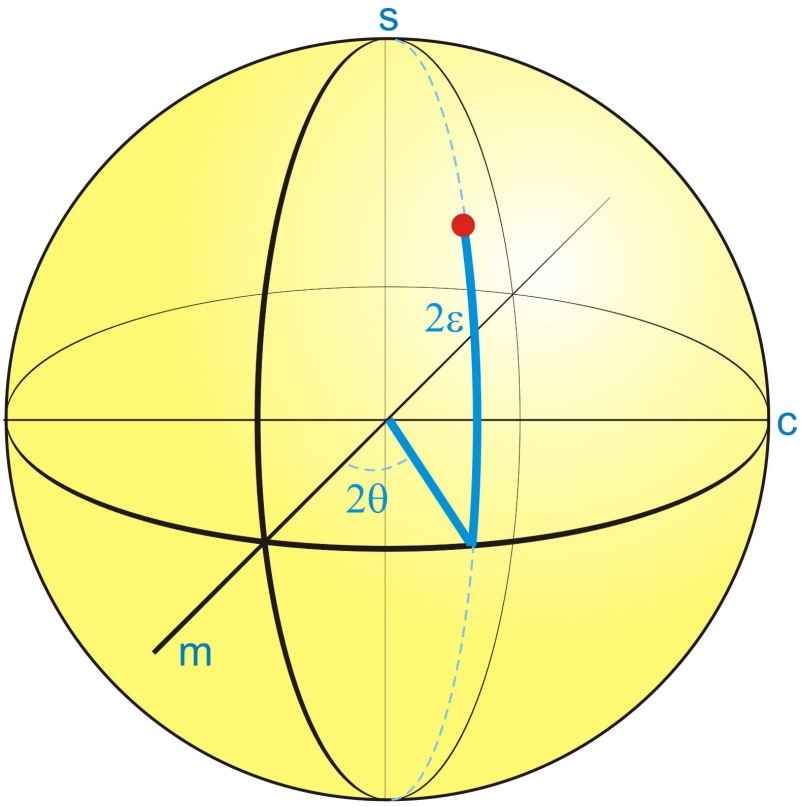


Figura 2-6. Esfera de Poincaré en términos de azimut-elevación.

2.3.1. Algunos ejemplos

En la Tabla 2-1 se muestran algunos SOPs de casos extremos y de otros casos intermedios con el fin de resaltar los aspectos importantes en la interpretación de dichos vectores a partir de su representación en la esfera de Poincaré. Para cada ejemplo se presentan las tres maneras de interpretar un determinado SOP: En forma de vector de Stokes, mediante la representación del campo eléctrico transversal a la propagación y a través de su posición tridimensional sobre la esfera de Poincaré.

En la primera y tercera fila de la Tabla 2-1 se pueden ver los cuatro SOP lineales completamente polarizados, situados en sus posiciones correspondientes en el ecuador de la esfera. En la segunda fila se aprecia el efecto que tiene un SOP con una parte de luz no polarizada: en el vector de Stokes el DOP es inferior al 100% y en la esfera de Poincaré el SOP no se situaría sobre la superficie de la esfera, sino en el interior. En cualquier caso estaría ubicado en el plano del ecuador, al tratarse de polarizaciones lineales. Los SOPs de la cuarta fila se corresponden con los dos estados circulares puros, que aparecen en los dos polos de la esfera. En el caso de la penúltima fila se muestran dos SOPs genéricos con $DOP = 1$ en los que el estado es elíptico. A medio camino entre circular dextrógiro y lineal a 45º en el primer caso y casi horizontal, con algo de circular levógiro, en el segundo. Por último, en la fila inferior se muestra luz no polarizada en el

caso de la izquierda y en el de la derecha un SOP formado por una parte de cada uno de los tres parámetros de Stokes, también con $DOP = 1$.

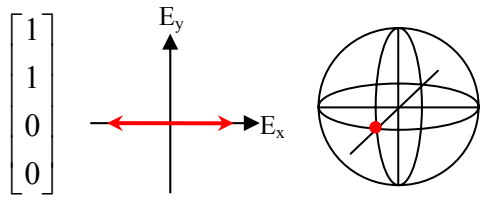
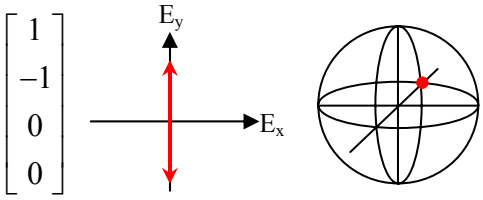
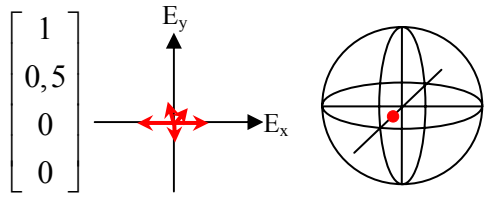
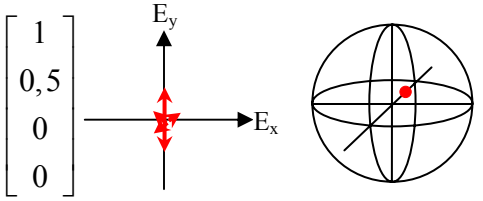
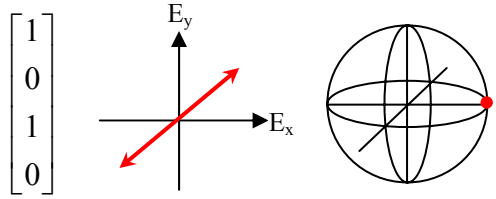
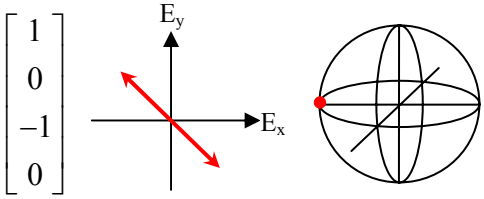
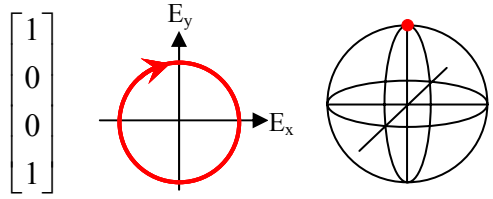
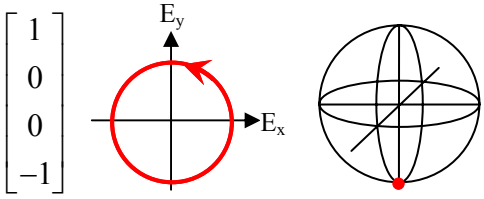
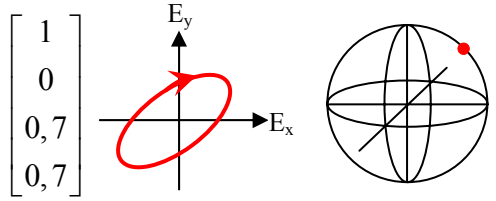
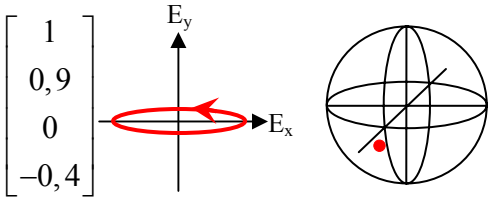
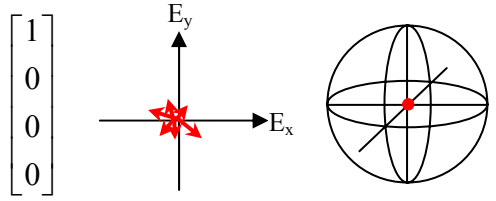
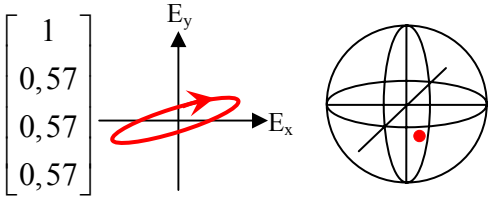
Horizontal 	***Vertical*** 
Parcialmente horizontal 	***Parcialmente vertical*** 
A 45º 	***A -45º*** 
Dextrógira 	***Levógira*** 
Elíptica dextrógira a 45º 	***Elíptica levógira a 0º*** 
Despolarizada 	***Elíptica dextrógira a 22º*** 

Tabla 2-1.Vectores de Stokes de diferentes SOPs.

2.4. ELEMENTOS MODIFICADORES DEL SOP

Existen tres formas posibles de modificar un determinado SOP:

(1) Cambiando la amplitud,

(2) Cambiando la fase o

(3) Cambiando la dirección de las componentes ortogonales a la propagación.

Como consecuencia existen tres posibles elementos básicos modificadores del SOP: El elemento que modifica las amplitudes ortogonales se llama polarizador lineal (o simplemente polarizador), el que introduce un retardo δ entre las componentes del campo eléctrico se conoce como retardador (también llamado compensador o lámina de ½ onda, ¼ onda, etc.) y finalmente si el elemento gira las componentes ortogonales del haz un determinado ángulo $\phi = 2\gamma$ alrededor de la dirección de la propagación, se trata de un rotador.

Cualquier elemento modificador del SOP puede ser descrito en términos de una matriz de Mueller. En las dos primeras filas de la Tabla 2-2 se muestran las matrices de algunos de los más comunes y en la última fila las formas genéricas que permiten deducir cualquier variación de los tres tipos de elementos modificadores.

Polarizador horizontal	***Polarizador vertical***	***Polarizador a 45º***	***Polarizador a -45º***
$\frac{1}{2}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{2}\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{2}\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{2}\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
Lámina ¼ onda	***Lámina ½ onda***	***Rotador ¼ onda***	***Rotador ½ onda***
$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Polarizador lineal genérico		***Rotador genérico***	***Retardador genérico***
$\frac{1}{2}\begin{bmatrix} 1 & \cos(2\beta) & \text{sen}(2\beta) & 0 \\ \cos(2\beta) & \cos^2(2\beta) & \cos(2\beta)\,\text{sen}(2\beta) & 0 \\ \text{sen}(2\beta) & \cos(2\beta)\,\text{sen}(2\beta) & \text{sen}^2(2\beta) & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$		$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(2\gamma) & -\text{sen}(2\gamma) & 0 \\ 0 & \text{sen}(2\gamma) & \cos(2\gamma) & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\delta) & -\text{sen}(\delta) \\ 0 & 0 & \text{sen}(\delta) & \cos(\delta) \end{bmatrix}$

Tabla 2-2. Matrices de Mueller de elementos modificadores del SOP.

Otra forma posible de tratar a los elementos modificadores del SOP es estudiando el efecto que producen en la esfera de Poincaré sobre un SOP determinado. Un polarizador lineal situaría cualquier SOP en algún punto del ecuador eliminando todas las componentees circulares que tuviera previamente. Como casos extremos, el polarizador podría trasladar al centro de la esfera una luz lineal que estuviera orientada a 90º de diferencia con el polarizador y dejaría inalterada una que estuviera alineada con él. En la Figura 2-7 se puede ver el efecto que tendrían un rotador y un retardador. En el caso del primero, como se ha dicho cambiaría la orientación de las componentes lineales del SOP dejando inalteradas la circular. Este movimiento en términos de la esfera de Poincaré se corresponde con una rotación alrededor de la línea que une ambos polos. Por último, el retardador lleva a cabo un giro sobre un eje contenido en el plano del ecuador, ya que no actúa sobre las componentes lineales, sino sobre la circular.

Conocidas las matrices genéricas de los tres posibles elementos modificadores del SOP, la potencia del álgebra de Mueller se hace patente en el hecho de que cualquier dispositivo o sistema óptico puede tratarse matemáticamente mediante la combinación de una o varias de estas matrices.

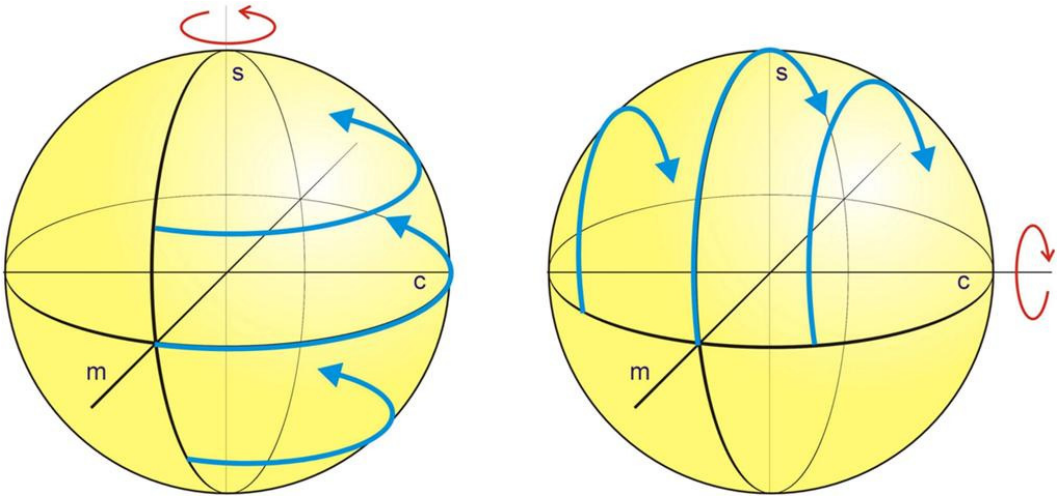


Figura 2-7. Efecto de un rotador y un retardador en la esfera de Poincaré.

2.5. CRISTALES LÍQUIDOS

El estado cristal líquido es un estado de la materia cuyas propiedades son intermedias entre los estados sólido y líquido. Existen numerosas variedades, pero las de mayor interés desde un punto de vista tecnológico son los llamados materiales termotrópicos calamíticos, cuya principal característica es que sus moléculas son alargadas y orientables, y como consecuencia presentan una alta birrefringencia o anisotropía óptica, esto es, muestran distintos índices de refracción n para distintas direcciones (Figura 2-8). En concreto el valor de n en la dirección aproximadamente paralela al eje molecular, llamado índice extraordinario, es mayor que los los dos n perpendiculares,

que tienen el mismo valor y son conocidos como índices ordinarios. Así la diferencia de índices de refracción es:

$$\Delta n = n_e - n_o > 0 \qquad \textbf{(2-22)}$$

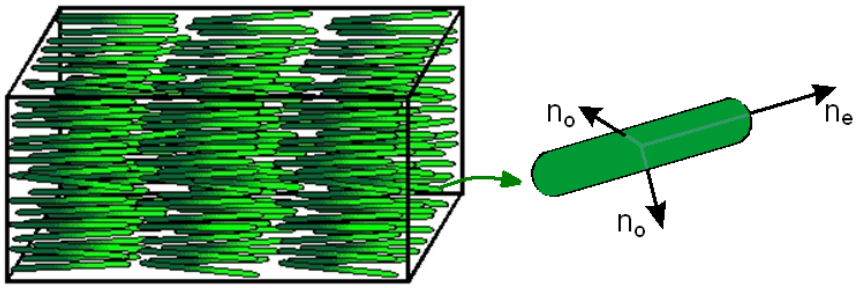


Figura 2-8. Molécula de cristal líquido.

Las pantallas de cristal líquido suelen estar compuestas por dos superficies de vidrio paralelas y selladas entre las que se introduce el cristal líquido. Esta estructura conforma una célula de cristal líquido o *sandwich*. Como se ha dicho, las moléculas de cristal líquido tienen forma elongada, de manera que, dentro de la célula, el material puede orientarse de varias formas proporcionando diferentes comportamientos de las moléculas al aplicar un campo eléctrico externo. Las caras interiores de las láminas de vidrio que componen la pantalla se acondicionan mediante procesos químico-físicos que determinan la orientación de las moléculas de cristal líquido. De esta manera se pueden obtener varias configuraciones (Figura 2-9) que proporcionan comportamientos ópticos diferentes:

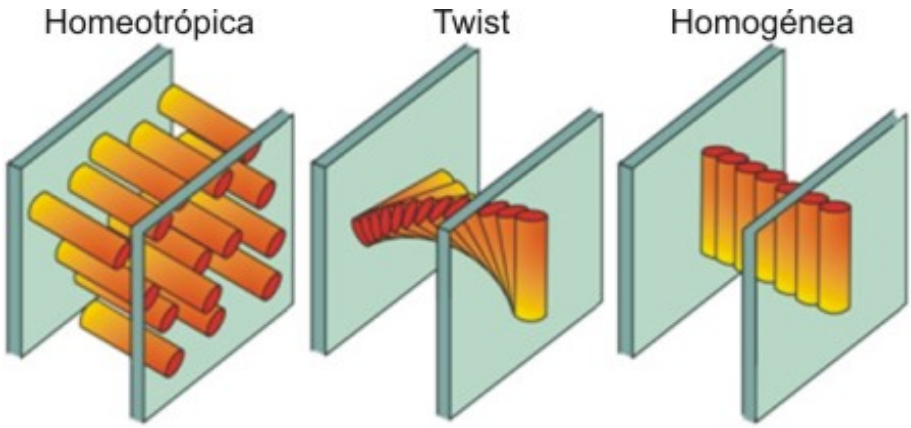


Figura 2-9. Diferentes configuraciones de pantallas de cristal líquido.

Las configuraciones homogéneas se comportan como retardadores del SOP cuyo retardo depende directamente del espesor de la célula (usualmente algunos μm). Por otra parte las configuraciones torsionadas o *twist* tienen la propiedad de hacer girar el plano de polarización de la luz el mismo ángulo que han girado las moléculas dentro del *display*, por lo tanto se pueden comportar como rotadores del SOP.

En el siguiente capítulo se estudiarán en más detalle las células de cristal líquido, analizando las diferentes alternativas disponibles y se presentará una manera de manipularlas en términos de matrices de Mueller con el objeto de poder llevar a cabo simulaciones matemáticas para estudiar su comportamiento.

3. Simulaciones caso ideal

Las técnicas para llevar a cabo la modulación de la señal láser así como en general el concepto del sistema de comunicación propuesto en este proyecto admiten un amplio número de diferentes configuraciones y variaciones. Mediante simulaciones con ordenador es posible evaluar fácilmente las prestaciones de unas sobre otras y así llevar a cabo un diseño mucho más fiable y eficaz del sistema al tiempo que se obtiene la capacidad de predecir y entender los resultados obtenidos en la fase experimental.

En este capítulo se presentan una serie de simulaciones informáticas basadas en el entorno de cálculo simbólico Maple del desarrollador Maplesoft. Se utilizará profusamente el álgebra de Mueller, introducida en el capítulo anterior, para manipular todos los elementos modificadores del SOP y para operar con los parámetros de Stokes, que, como se ha visto, describen completamente la polarización de una señal luminosa.

3.1. MODELO DE UNA PANTALLA DE CRISTAL LÍQUIDO

En este apartado se estudia el comportamiento de una pantalla o célula de cristal líquido en términos de elemento modificador del SOP. Como se introdujo en el capítulo anterior, cualquier elemento modificador del SOP puede ser descrito mediante la matriz de Mueller equivalente de una agrupación de algunos de los tres elementos básicos que se describieron en el apartado 2.4.

3.1.1. Introducción

En la aplicación de interés para este proyecto se necesita que el modulador basado en cristal líquido actúe como un retardador analógico, capaz de hacer migrar el SOP a cualquier punto de la esfera de Poincaré. Las dos configuraciones que mejor se adaptan a este requerimiento son:

a) Cristales líquidos esmécticos con respuesta en V y configuración homogénea (SmV). Estos cristales líquidos se alinean paralelamente a las placas de la célula. Al aplicar una tensión, los ejes ordinario y extraordinario giran en el plano de las placas un cierto ángulo manteniendo la birrefringencia aproximadamente constante. Así pues, la célula se comporta como un retardador giratorio cuyo ángulo puede variarse con una tensión externa. Un caso particular de SmV, de gran interés para esta aplicación como se verá en adelante, son los materiales ortocónicos, cuyo ángulo de giro es de 90º.

b) Cristales líquidos nemáticos de anisotropía eléctrica negativa en configuración homeotrópica (VAN). En esta configuración, el eje extraordinario se alinea perpendicular a las placas, por lo que un haz a incidencia normal, con independencia de su polarización, atraviesa un medio isótropo. Al aplicar tensión, el eje extraordinario migra desde la posición perpendicular a paralela a las placas. El efecto neto es que surge una birrefringencia que va aumentando a medida que se incrementa la tensión.

Para ambos casos los resultados serían equivalentes. Sin embargo se ha optado por la opción SmV ya que la velocidad de conmutación de estos materiales es casi dos órdenes de magnitud superior.

3.1.2. Modelo matricial

La matriz de Mueller de un cristal líquido SmV puede modelarse como el producto de tres matrices: la correspondiente a un retardador (el efecto del propio cristal líquido sobre la luz que lo atraviesa) entre dos rotadores (el efecto de aplicar tensión sobre el cristal líquido orientándolo).

$$ROT(\gamma)=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & \cos(2\gamma) & -\operatorname{sen}(2\gamma) & 0\\ 0 & \operatorname{sen}(2\gamma) & \cos(2\gamma) & 1\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \quad \textbf{(3-1)}$$

$$RET(\delta)=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & \cos(\delta) & -\operatorname{sen}(\delta)\\ 0 & 0 & \operatorname{sen}(\delta) & \cos(\delta)\end{bmatrix} \quad \textbf{(3-2)}$$

En las ecuaciones (3-1) y (3-2) se muestran respectivamente las matrices de Mueller de un rotador genérico de $\phi = 2\gamma$ grados y la de un retardador genérico de δ grados. El ángulo 2γ del rotador se expresa en términos de ϕ para que la variación angular total quede comprendida en un intervalo de 2π. De esta manera el ángulo ϕ puede tomar valores entre 0 y 2π, y el γ entre 0 y π. En base a las matrices del retardador y del rotador se puede calcular la matriz de Mueller equivalente para un cristal líquido SmV de la siguiente manera:

$$CL(\phi,\delta)=ROT(\phi)\cdot RET(\delta)\cdot ROT(-\phi) \quad \textbf{(3-3)}$$

que resulta en:

$$CL(\phi,\delta)=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & A & B & C\\ 0 & B & D & E\\ 0 & C & -E & F\end{bmatrix} \quad \textbf{(3-4)}$$

donde:

$$A=\cos^2(2\phi)+\operatorname{sen}^2(2\phi)\cdot\cos(\delta) \quad \textbf{(3-5)}$$

$$B=-\cos(2\phi)\cdot\operatorname{sen}(2\phi)\cdot(\cos(\delta)-1) \quad \textbf{(3-6)}$$

$$C=\operatorname{sen}(2\phi)\cdot\operatorname{sen}(\delta) \quad \textbf{(3-7)}$$

$$D=\operatorname{sen}^2(2\phi)+\cos^2(2\phi)\cos(\delta) \quad \textbf{(3-8)}$$

$$E=-\cos(2\phi)\operatorname{sen}(\delta) \quad \textbf{(3-9)}$$

$$F=\cos(\delta) \quad \textbf{(3-10)}$$

El retardo introducido por el cristal líquido se representa por δ e inicialmente se considera ideal por simplicidad, esto es, constante. El término ϕ representa al ángulo variable por tensión que del mismo modo se considerará ideal, variando linealmente con la tensión:

$$\phi \propto \frac{V}{V_{máx}} \qquad \textbf{(3-11)}$$

En una célula de cristal líquido real ambos términos δ y ϕ tendrán una dependencia no lineal con la tensión externa aplicada, que será necesario medir experimentalmente para introducirla en la ecuación (3-4) si se desea tener en consideración el efecto real que tiene el cristal líquido sobre el SOP.

3.2. MODELO DE UN RETROMODULADOR

El retromodulador es el núcleo principal del presente proyecto por ser el encargado de llevar a cabo la modulación de la polarización sobre las señales incidentes. En este apartado se presentan las matrices de Mueller que lo modelan así como sus diferentes configuraciones, de entre las cuales será necesario elegir una para su implementación en el sistema final.

3.2.1. Modelo de un retrorreflector

Como se vio en el apartado 1.3.1, un retrorreflector es un dispositivo óptico consistente en tres espejos dispuestos mutuamente ortogonales formando una estructura equivalente o igual a la esquina de un cubo. Este dispositivo tiene la propiedad de la retrorreflexión, esto es, la radiación incidente desde cualquier dirección es devuelta tras llevar a cabo tres reflexiones en el interior del dispositivo, una en cada espejo, hacia la misma dirección pero en un sentido opuesto.

La matriz de Mueller de un retrorreflector depende de una serie de factores, tales como la longitud de onda de la luz incidente, el material con el que estén fabricadas las superficies reflexivas, el ángulo de incidencia y el tipo de retrorreflector usado (de esquina de cubo o de reflectores alineados). Para la longitud de onda, los ángulos de incidencia y las características del retrorreflector usado en este proyecto, así como para la precisión con la que se van a medir los SOPs en este proyecto, es perfectamente factible el empleo de la matriz de Mueller de un retrorreflector ideal, que viene dada por [25]:

$$RR = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \qquad \textbf{(3-12)}$$

En la Tabla 3-1 se muestra una serie de ejemplos de vectores de Stokes de entrada y salida para ilustrar el efecto del retrorreflector sobre un haz incidente en términos de polarización. Se puede comprobar que siempre modifica el sentido de giro de la componente circular y, en función de la orientación del retrorreflector, deja pasar sin

alteración una componente lineal (horizontal/vertical o bien a 45º/-45º) y devuelve la ortogonal rotada 90º.

$Entrada = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Rightarrow Salida = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$Entrada = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \Rightarrow Salida = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}$
$Entrada = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \Rightarrow Salida = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$	$Entrada = \begin{bmatrix} 1 \\ 0,57 \\ 0,57 \\ 0,57 \end{bmatrix} \Rightarrow Salida = \begin{bmatrix} 1 \\ 0,57 \\ -0,57 \\ -0,57 \end{bmatrix}$

Tabla 3-1. Ejemplos de funcionamiento del retrorreflector.

3.2.2. Conjunto retrorreflector + pantalla cristal líquido

El conjunto formado por el retrorreflector y la pantalla de cristal líquido componen el retromodulador y la matriz de Mueller que define al sistema se obtiene de aplicar la conexión en cascada de ambos dispositivos:

$$RM(\phi,\delta) = CL(-\phi,\delta)\cdot RR\cdot CL(\phi,\delta) \qquad \textbf{(3-13)}$$

Como se ve la pantalla de cristal líquido tiene un doble efecto sobre la luz incidente: a la entrada del retromodulador y, tras su reflexión en el retrorreflector, a la salida del mismo. La matriz equivalente del retromodulador, resultado de sustituir las ecuaciones (3-4) y (3-12) en la ecuación (3-13), queda:

$$RM(\phi,\delta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A & B & C \\ 0 & -B & D & E \\ 0 & C & -E & F \end{bmatrix} \qquad \textbf{(3-14)}$$

donde:

$$A = 2\cos^2(\delta) - 2\cos^2(2\phi)\cdot\cos^2(\delta) + 2\cos^2(2\phi) - 1 \qquad \textbf{(3-15)}$$

$$B = -2\cos(2\phi)\cdot \text{s en}(2\phi)\cdot(\cos^2(\delta) - 1) \qquad \textbf{(3-16)}$$

$$C = 2\,\text{s en}(2\phi)\cdot\text{s en}(\delta)\cdot\cos(\delta) \qquad \textbf{(3-17)}$$

$$D = 2\cos^2(2\phi) - 2\cos^2(2\phi)\cos^2(\delta) - 1 \qquad \textbf{(3-18)}$$

$$E = 2\cos(2\phi)\cdot\text{s en}(\delta)\cdot\cos(\delta) \qquad \textbf{(3-19)}$$

$$F = 1 - 2\cos^2(\delta) \qquad \textbf{(3-20)}$$

Así queda definida la matriz de Mueller del retromodulador, que se usará en los sucesivos apartados como el elemento central de diversos montajes y que modela a

cualquier retromodulador basado en cristales líquidos SmV, dado que la dependencia de ϕ y δ con la tensión aplicada es una medida experimental que es posible llevar a cabo con la célula de cristal líquido que vaya a ser empleada.

3.3. MODULACIONES EN AMPLITUD

En este apartado se estudia la forma más simple de añadir información a la luz incidente en el retromodulador. La modulación llevada a cabo por la pantalla de cristal líquido se basa en un principio parecido al de los LCD, en los que por tensión se varían los retardos lineales inducidos de forma que una polarización lineal atravesará el polarizador sin alteración y otra se cortará por completo. El efecto conseguido es que en el receptor se recibe luz o ausencia luz.

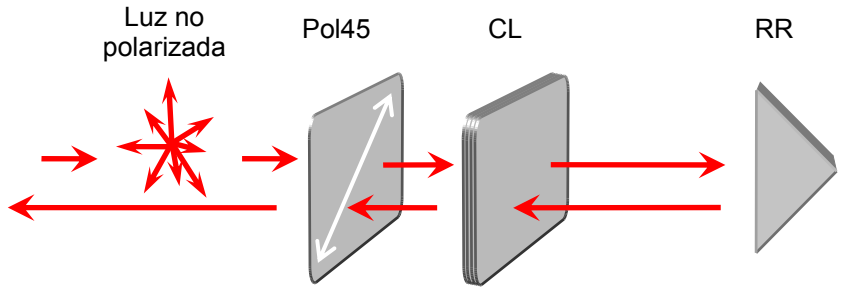


Figura 3-1. Esquema básico del retromodulador de amplitud.

En la Figura 3-1 se muestra el esquema del retromodulador estudiado en este apartado, válido para OOK y M-ASK sin más que cambiar los retardos introducidos por la pantalla de cristal líquido, que se traducen en diferentes tensiones.

La utilización de esta forma de modulación ofrece como ventaja la máxima simplicidad en el receptor. Se detectan niveles de intensidad no siendo necesario engancharse a la señal para extraer la información. Esto además aporta la ventaja de que la señal de bajada es independiente de la orientación del retromodulador en el espacio. Como principal desventaja se encuentra la baja tasa binaria que proporciona este esquema y la pérdida de la mitad de la potencia lumínica que introduce el polarizador de entrada/salida.

3.3.1. OOK

El caso de modulación de encendido y apagado (OOK) es el más simple que puede llevarse a acabo con el retromodulador pues se basa en la presencia o ausencia de luz como codificación de unos y ceros respectivamente. Es una modulación de un solo símbolo que proporciona una velocidad binaria igual a la de símbolo, y por lo tanto, mínima.

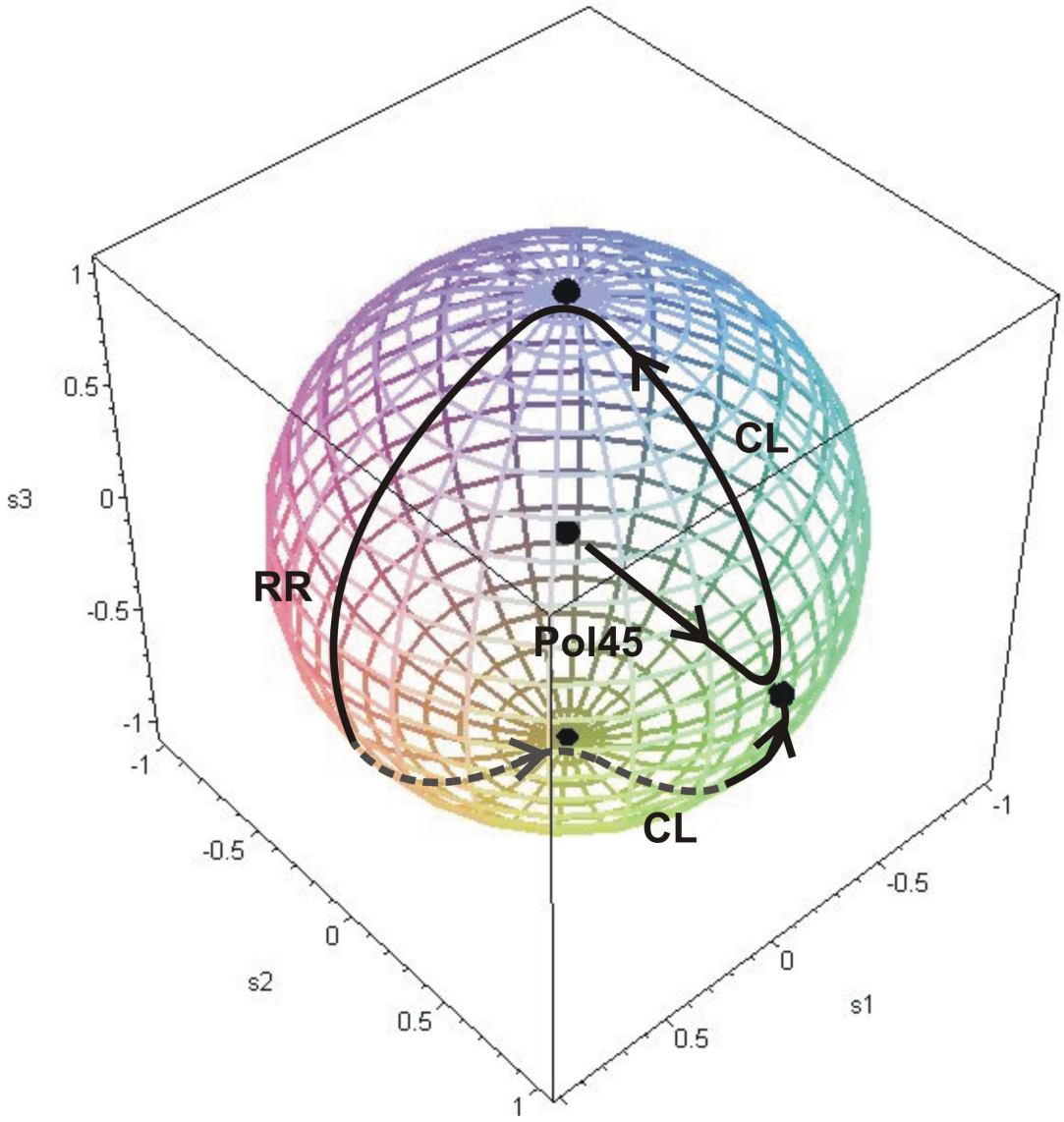


Figura 3-2. Recorrido del SOP-ON en la esfera de Poincaré.

El principio en que se basa esta modulación es el siguiente: La luz despolarizada atraviesa el polarizador lineal convirtiéndose en luz a 45º y perdiendo la mitad de la potencia en el proceso. Al atravesar la pantalla de un cristal líquido ortocónico el SOP de 45º o bien se quedará donde está o bien se convertirá en luz dextrógira dependiendo de que se le aplique tensión al CL o no. En el segundo caso (Figura 3-2), el retrorreflector convertirá el SOP en luz levógira y al atravesar de nuevo la célula volverá al estado original de 45º que atraviesa el polarizador sin alteración. En el primer caso (Figura 3-3) en el que la luz no sufre retardo, al atravesar el retrorreflector la luz a 45º se convierte en luz a -45º y tras atravesar el CL, de nuevo sin efecto, se corta totalmente al encontrarse con el polarizador alineado a 45º.

El código Maple correspondiente a esta simulación se muestra en el apéndice I.1.

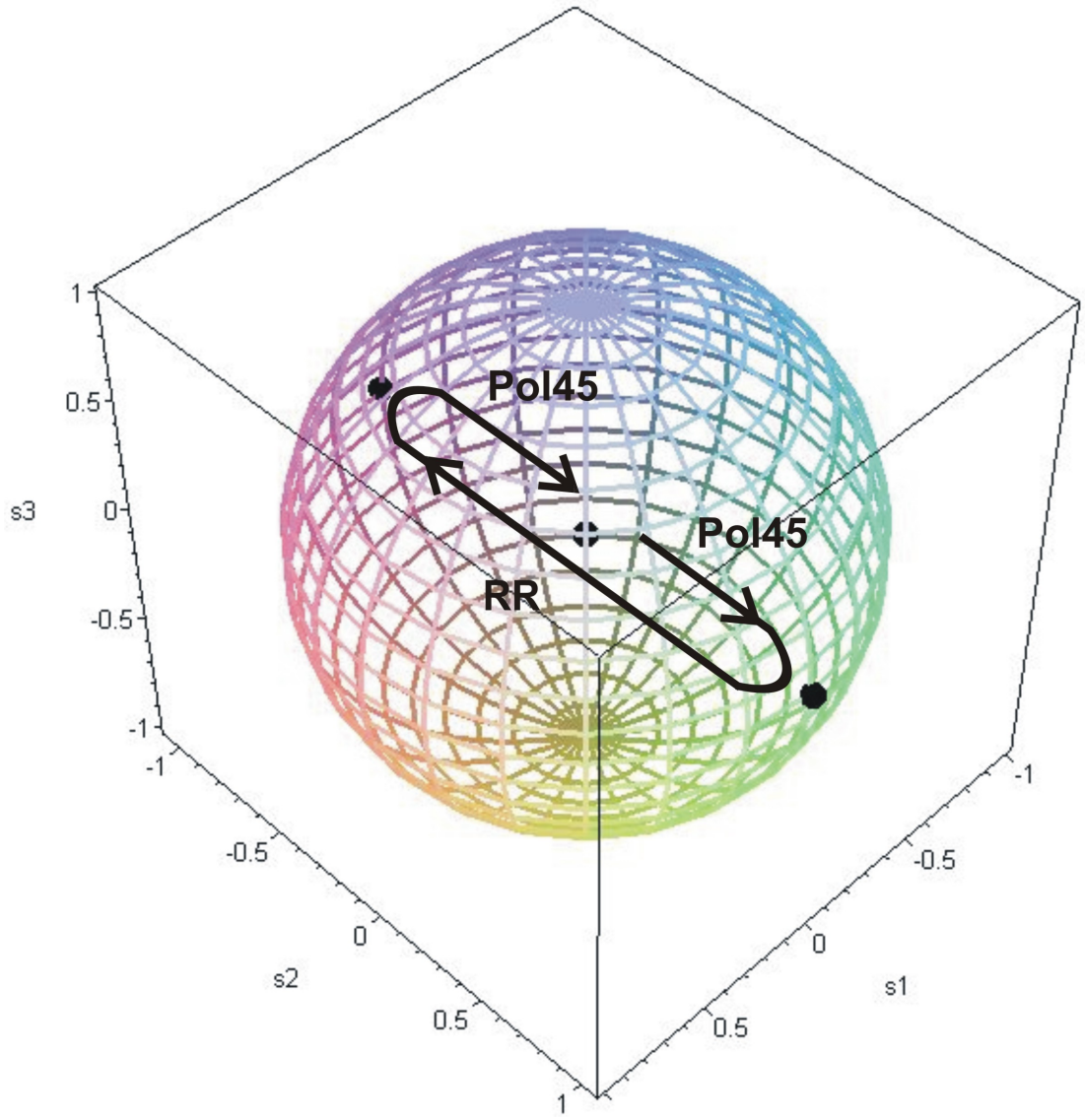


Figura 3-3. Recorrido del SOP-OFF en la esfera de Poincaré.

3.3.2. M-ASK

El caso de la modulación de encendido y apagado es un caso particular de la modulación M-ASK en la que se consiguen M niveles distintos de intensidad de luz. Esta técnica tiene el inconveniente de que es necesario un receptor más complejo que pueda distinguir entre los diferentes niveles para extraer la información codificada en cada uno. Por otra parte, el incremento del número de símbolos M, para una misma velocidad de conmutación del CL, aporta un aumento en la tasa binaria de:

$$Tb_{M-ASK} = Tb_{OOK} \cdot \log_2(M) \qquad \textbf{(3-21)}$$

Por ejemplo, una modulación 4-ASK tendría 4 símbolos y proporcionaría una tasa binaria del doble de la equivalente OOK. Se conseguiría aplicando cuatro tensiones incrementales desde cero hasta la máxima, obteniendo cuatro niveles de intensidad

lumínica crecientes. Si, como en el apartado 3.3.1, se entra al retromodulador con luz despolarizada, los cuatro símbolos posibles serían, en términos de vectores de Stokes, los siguientes:

V=0	**$V=V_{máx}/3$**
$Entrada = \begin{bmatrix}1\\0\\0\\0\end{bmatrix} \Rightarrow Salida = \begin{bmatrix}1/2\\0\\1/2\\0\end{bmatrix}$	$Entrada = \begin{bmatrix}1\\0\\0\\0\end{bmatrix} \Rightarrow Salida = \begin{bmatrix}15/32\\0\\15/32\\0\end{bmatrix}$
$V=2*(V_{máx}/3)$	**$V=V_{máx}$**
$Entrada = \begin{bmatrix}1\\0\\0\\0\end{bmatrix} \Rightarrow Salida = \begin{bmatrix}7/32\\0\\7/32\\0\end{bmatrix}$	$Entrada = \begin{bmatrix}1\\0\\0\\0\end{bmatrix} \Rightarrow Salida = \begin{bmatrix}0\\0\\0\\0\end{bmatrix}$

Tabla 3-2. SOPs de salida para una modulación 4-ASK.

Como se puede ver en la Tabla 3-2, el SOP es el mismo en los cuatro casos ya que $DOP = 1$ siempre. Sin embargo la irradiancia (el primero de los parámetros de Stokes) es inversamente proporcional a la tensión aplicada, por lo que en el receptor se detectarán cuatro niveles distintos de potencia luminosa. También se puede comprobar que la disminución de la luminancia con el aumento de tensión no es lineal, por lo que habría que buscar las tensiones de cada SOP que hagan que dicha disminución lo sea. Por ejemplo, en el caso de 4-ASK las tensiones de los SOPs intermedios que harían que dicha disminución fuera lineal serían $V = 0{,}431 \cdot V_{máx}$ y $V = 0{,}564 \cdot V_{máx}$. Este procedimiento será siempre necesario ya que la correspondencia entre tensiones y SOPs nunca es lineal, por lo que habrá que buscar siempre las tensiones que hagan que un SOP se sitúe en el punto exacto que se desea sobre la esfera de Poincaré.

El código Maple correspondiente a esta simulación se muestra en el apéndice I.2.

3.4. MODULACIONES DEL SOP CON UN CL

La técnica que se estudió en el apartado anterior para modular los símbolos consistía únicamente en lograr variaciones de intensidad en la señal. En este apartado se estudia otra forma de usar el retromodulador, en este caso para modular los símbolos directamente sobre la polarización de la luz. Si bien en el apartado 3.3.2 un mismo SOP se correspondía con los M símbolos posibles, en adelante existirá una relación unívoca entre SOPs y símbolos.

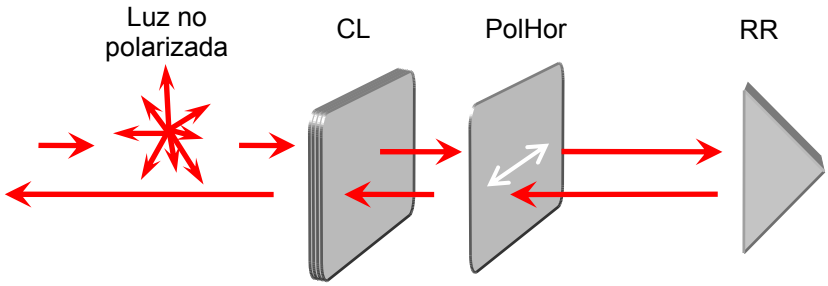


Figura 3-4. Esquema básico del retromodulador del SOP.

Como se puede apreciar en la Figura 3-4, el esquema del retromodulador utiliza los mismos elementos que el modulador de amplitud del apartado 3.3, sin más que cambiar el orden de la pantalla de CL y el polarizador. Esto tiene la consecuencia de que el efecto del CL solo se manifiesta en el camino de retorno del haz, tras su reflexión en el retrorreflector, ya que el efecto sobre la luz despolarizada es nulo. De esta manera solo existe un paso equivalente a través del CL, en lugar de dos. Contemplando este fenómeno, el esquema equivalente del retromodulador sería simplemente el de una luz lineal horizontal atravesando una célula de cristal líquido. Naturalmente es posible elegir la orientación de la luz lineal sin más que rotar el polarizador.

Cabe mencionar que el uso de luz despolarizada se debe únicamente a su simplicidad y que puede ser sustituida por luz circular, fácilmente conseguible de una fuente láser real, sin ningún cambio en el resultado de la modulación.

Comparte con el modulador de amplitud el inconveniente de la pérdida del 50% de la irradiancia de la señal al atravesar el polarizador pero en este caso todos los símbolos tienen idéntica potencia al llegar al receptor dado que la información va modulada en la polarización de la luz, no en la amplitud. Esto lo hace más inmune al ruido aditivo incorporado en el canal de comunicación ya que el receptor no se ve limitado por la detección de pequeñas variaciones de potencia para recuperar la información.

3.4.1. SOPs lineales

Una de las posibles configuraciones del retromodulador de SOPs se puede conseguir utilizando un CL ortocónico de 180º de retardo (lo que puede conseguirse equivalentemente con dos células consecutivas de 90º excitadas mediante la misma tensión).

En la Figura 3-5 se representa mediante una línea negra en el paralelo ecuatorial los posibles SOPs que es posible alcanzar con este retromodulador, así como un ejemplo de una modulación de cuatro SOPs equiespaciados tanto en distancia como en tensión.

Dado que la línea descrita por los SOPs alcanzables es la del ecuador, los símbolos de esta modulación estarán formados por luces lineales a distintos ángulos. En el ejemplo se ve luz horizontal, vertical y a ±45º, en función del voltaje con que se excita el CL.

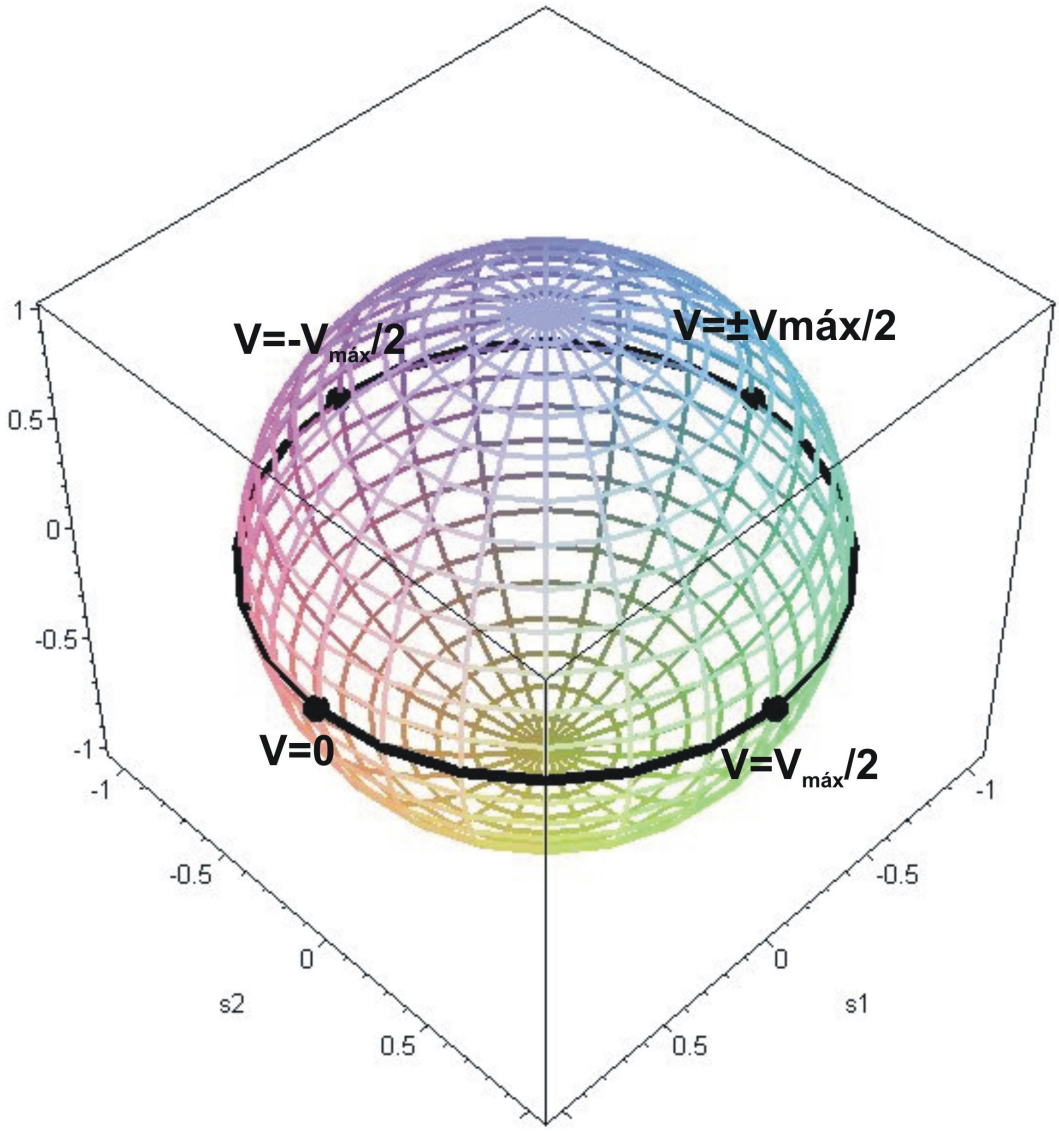


Figura 3-5. Posibles SOPs lineales alcanzables con el retromodulador de SOPs de un solo CL.

Tal como se ha mencionado, todos los símbolos de esta modulación tendrán idéntica potencia en la estación receptora, lo que obliga a hacer uso de un detector distinto al del apartado 3.3, que solo necesitaba discriminar entre niveles de potencia recibida. En este caso el detector debe poder distinguir diferentes SOPs. Más adelante se describirá cómo es posible llevar a cabo esta detección.

El código Maple correspondiente a esta simulación se muestra en el apéndice I.3.

3.4.2. SOPs elípticos

En este apartado se muestra otra posible configuracion del retromodulador de SOPs, esta vez como generador de distintas luces elípticas. Para ello únicamente es necesario modificar el retardo del CL, que en este caso será de 90º.

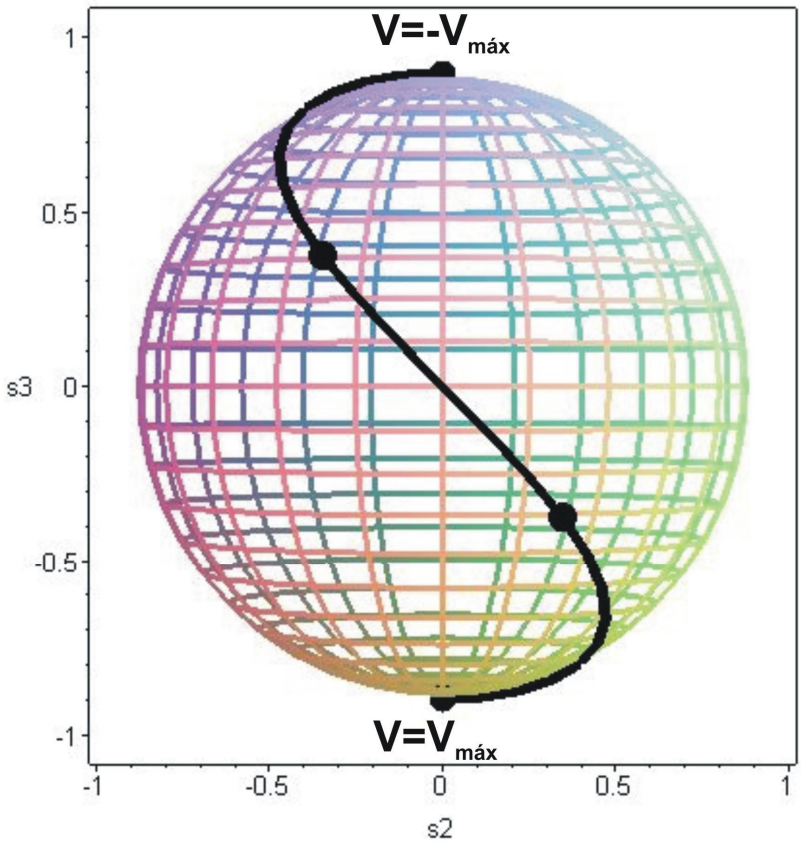


Figura 3-6. Posibles SOPs elípticos alcanzables con el retromodulador de SOPs de un solo CL.

En la Figura 3-6 se muestra, sobre los ejes S_2 y S_3 para una mejor visualización, el resultado de la simulación de este retromodulador en el que se aprecian de nuevo los posibles SOPs que es posible alcanzar mediante la aplicación de diferentes tensiones. Así mismo, los puntos representan un ejemplo de una modulación de cuatro símbolos equiespaciados en distancia sobre la esfera de Poincaré, no así en voltaje, dado que en este caso la línea que describe los posibles SOPs es irregular.

El código Maple correspondiente a esta simulación se muestra en el apéndice I.4.

3.5. MODULACIONES DEL SOP CON 2 CL INDEPENDIENTES

En el apartado anterior se estudió cómo el retromodulador básico del apartado 3.2 era capaz de generar una constelación de M símbolos. Como se vio, los posibles SOPs siempre estaban descritos por una línea circunscrita sobre la esfera de Poincaré. Es

posible diseñar un retromodulador que aproveche al máximo la capacidad de modulación de los CL ofreciendo la posibilidad de conseguir SOPs por toda la superficie de la esfera. En este apartado se describe la solución propuesta para obtener dicha capacidad total de modulación.

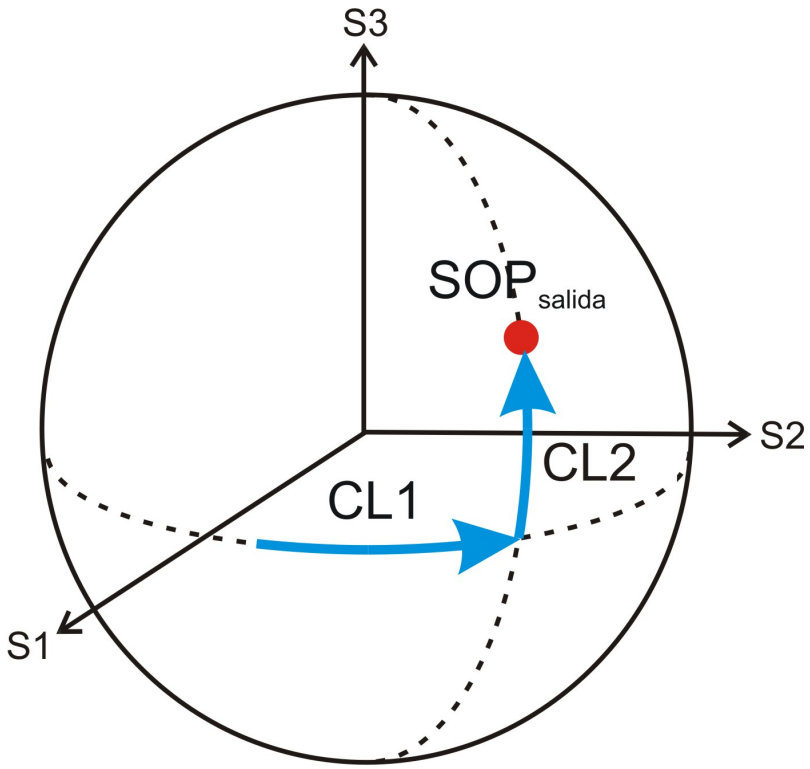


Figura 3-7. Control del acimut y la elevación del SOP de salida mediante dos células de cristal líquido.

Observando el comportamiento del retromodulador de los apartados 3.4.1 y 3.4.2 se deduce que si fuera posible combinar ambos efectos sobre el SOP en un único retromodulador sería posible cubrir la esfera de Poincaré completamente. Esto se consigue modificando el esquema básico del retromodulador usado hasta ahora mediante la incorporación de otra pantalla de CL adicional excitada por una tensión independiente. De esta manera es posible controlar con una pantalla el acimut y con la otra la elevación que tendrá el SOP de salida sobre la esfera (Figura 3-7).

3.5.1. Esquema de dos CL y polarizador

En la Figura 3-8 se puede observar un primer posible esquema, basado directamente en el del apartado 3.4, sin más que añadir otra célula de CL. Comparte con él la propiedad de que sólo existe un paso efectivo a través de cada pantalla de CL que tiene lugar tras la reflexión en el retrorreflector. En este caso el primer CL (el más próximo al retrorreflector) introduce un retardo de π, siendo de $\pi/2$ el segundo (el más alejado) y ambos están orientados con el mismo ángulo alrededor del eje óptico.

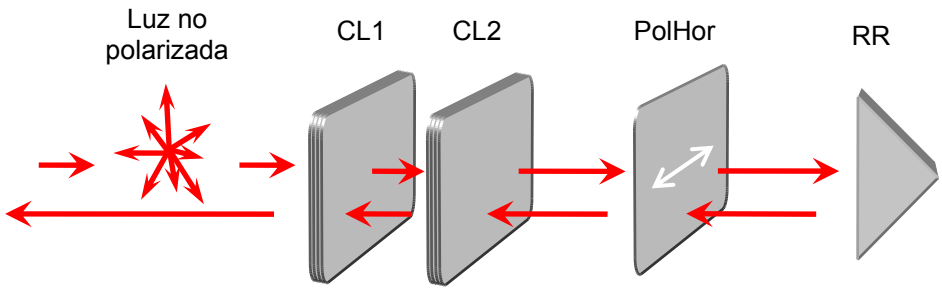


Figura 3-8. Esquema básico del retromodulador del SOP de dos CL independientes.

La función de la primera de las células es determinar el meridiano donde se situarán los posibles SOPs, es decir, para una tensión fija del primer CL, los SOPs alcanzables mediante variaciones del voltaje con que se ataca al segundo CL se situarán a lo largo de un círculo con el mismo acimut. En la Tabla 3-3 queda patente esta propiedad y se puede ver cómo evolucionan los meridianos para seis tensiones diferentes aplicadas a la primera célula.

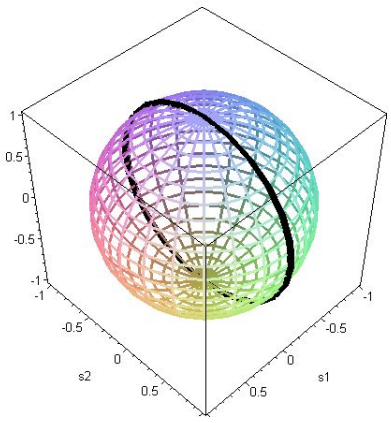
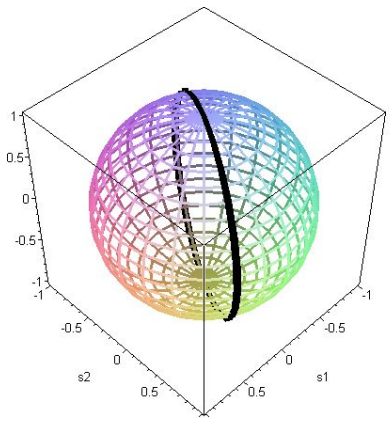
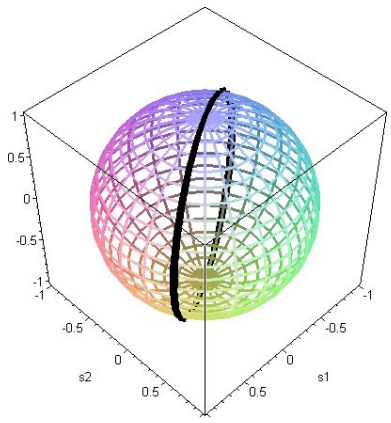
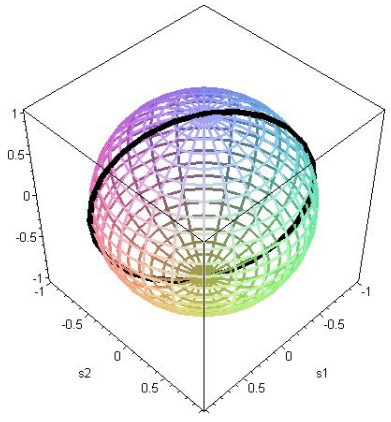
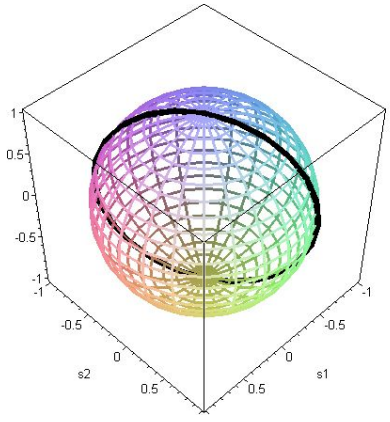
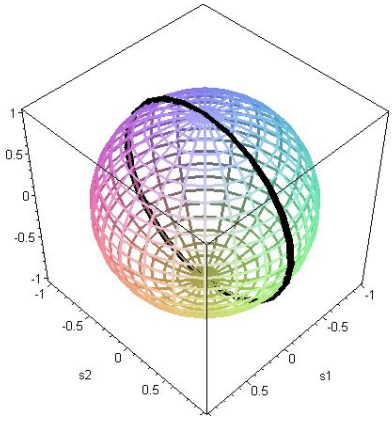
V1 = -V_{max}	***V1 = -2*V_{max}/6***	***V1 = -V_{max}/6***
		
V1 = V_{max}/6	***V1 = 2*V_{max}/6***	***V1 = V_{max}***
		

Tabla 3-3. Control del meridiano mediante distintas tensiones V1 manteniendo en todos V2 desde -V_{max} a V_{max}.

Para conseguir situar un SOP en un punto determinado de la esfera solo falta elegir la elevación de cada símbolo. Esto se lleva a cabo determinando la tensión de la segunda de las pantallas de CL. En la Figura 3-9 se muestra un ejemplo en el que se han obtenido los seis SOPs fundamentales: Lineal horizontal, lineal vertical, lineal a ±45º, circular dextrógiro y circular levógiro.

Esta técnica proporciona teóricamente un 100% de cobertura en la esfera de Poincaré (Figura 3-10), por lo que en principio es posible conseguir cualquier SOP que se desee, pudiendo crear constelaciones de tantos símbolos como sea necesario. La ventaja respecto a las anteriores modulaciones es clara: sin más que añadir una pantalla de CL adicional el número de símbolos posibles crece drásticamente, así como la tasa binaria que ofrece la modulación.

Dejando de momento aparte una serie de efectos reales que se tendrán en consideración en el siguiente capítulo, la limitación recae en la sensibilidad del receptor en términos de la mínima distancia entre distintos símbolos de la constelación que puede discriminar.

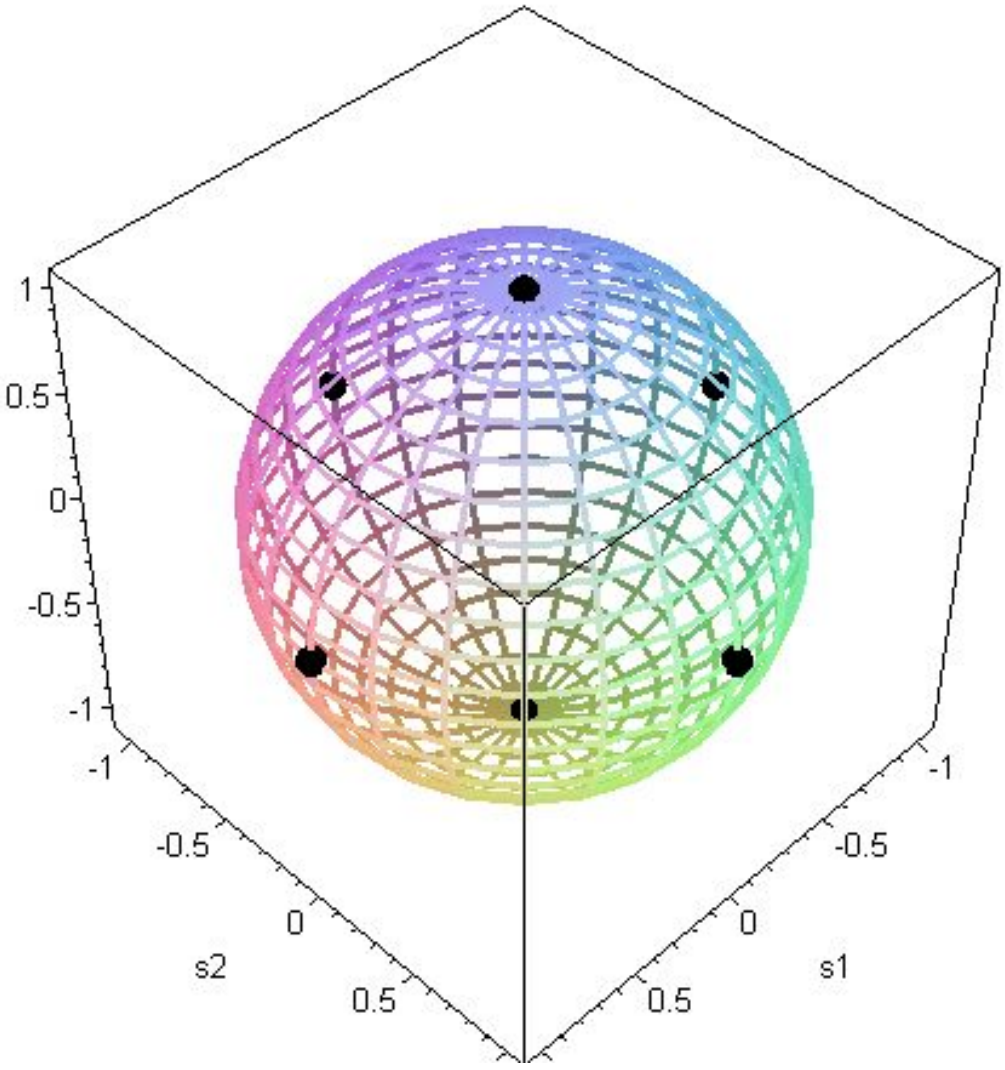


Figura 3-9. Los seis SOPs fundamentales.

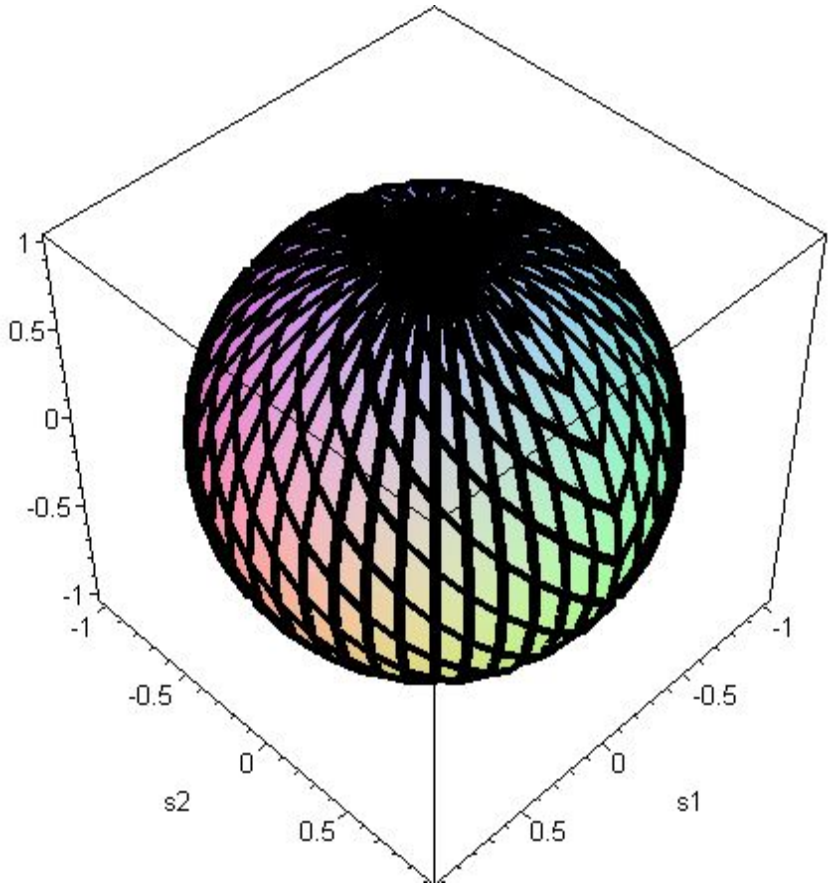


Figura 3-10. 100% de cobertura de la esfera de Poincaré.

El código Maple correspondiente a esta simulación se muestra en el apéndice I.5.

3.5.2. Esquema de dos CL sin polarizador

Una configuración alternativa más simple del retromodulador del apartado anterior se muestra en la Figura 3-11. En este caso ha sido eliminado el polarizador, por lo que ya no se entra con luz despolarizada, que no sufriría ningún efecto por parte de los CLs, sino circular. También la primera célula de CL ha sido cambiada por otra de $\pi/2$, de modo que ambas tienen el mismo retardo.

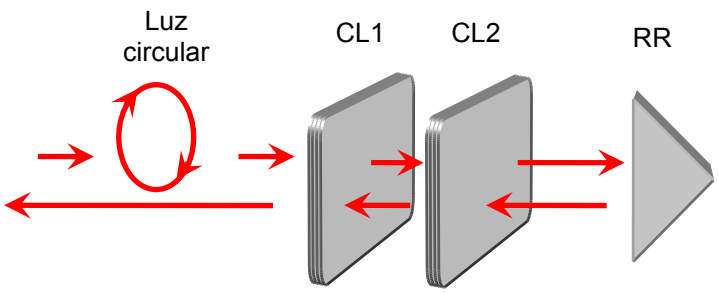


Figura 3-11. Esquema simplificado del retromodulador del SOP de dos CL independientes.

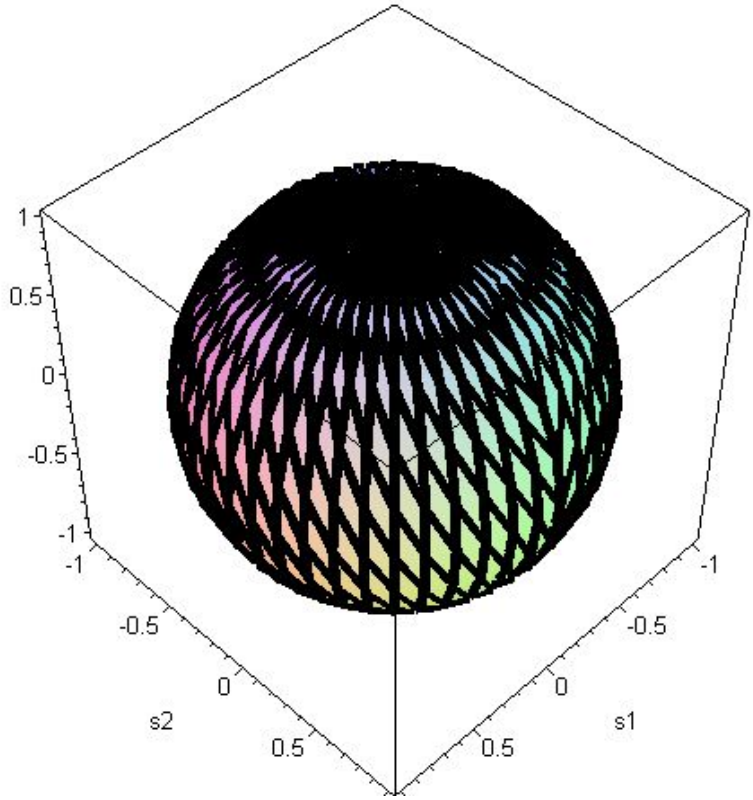


Figura 3-12. 100% de cobertura de la esfera de Poincaré.

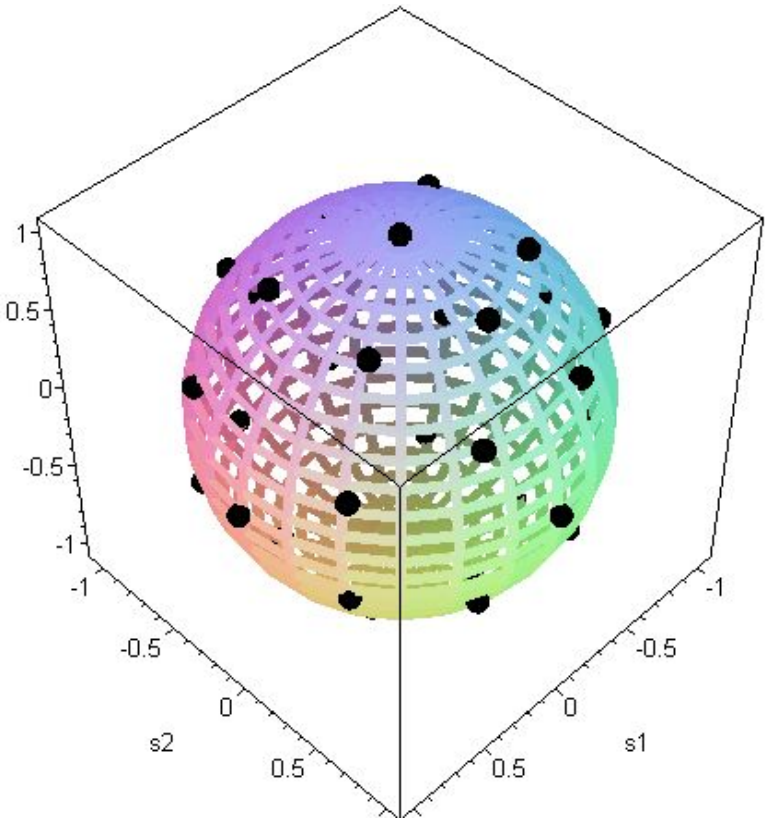


Figura 3-13. Constelación de 32 SOPs equidistantes.

El resultado de las simulaciones es idéntico al del apartado 3.5.1. Sin embargo, en el siguiente capítulo quedarán patentes una serie de diferencias existentes entre ambas configuraciones al considerar los efectos reales, que harán que uno sea preferible sobre el otro dependiendo de las condiciones. Por último, en la Figura 3-13 se muestra una posible constelación de 32 símbolos representados por 32 SOPs equidistantes basados en una superficie cubierta del 100% como la de la Figura 3-12. El código Maple correspondiente a esta simulación se muestra en el apéndice I.6.

3.6. DETECTOR DEL SOP

Los retromoduladores vistos en este capítulo, a excepción de los de amplitud del apartado 3.3, generan constelaciones formadas por SOPs de idéntica potencia distribuidos arbitrariamente sobre la esfera de Poincaré, lo que implica que para distinguir unos SOPs de otros es necesario un polarímetro. En este apartado se propone uno basado en la realización de cuatro medidas simultáneas de la misma señal seguido de un procesado paralelo de cada una de ellas para calcular los parámetros de Stokes de la señal recibida. Las matrices de Mueller necesarias para dicho detector son las correspondientes a un polarizador genérico (3-22) y un retardador lineal genérico (3-23):

$$Pol(\beta)=\frac{1}{2}\begin{bmatrix} 1 & \cos(2\beta) & \operatorname{sen}(2\beta) & 0 \\ \cos(2\beta) & \cos^2(2\beta) & \cos(2\beta)\operatorname{sen}(2\beta) & 0 \\ \operatorname{sen}(2\beta) & \cos(2\beta)\operatorname{sen}(2\beta) & \operatorname{sen}^2(2\beta) & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \qquad \textbf{(3-22)}$$

$$Ret(\delta)=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\delta) & -\operatorname{sen}(\delta) \\ 0 & 0 & \operatorname{sen}(\delta) & \cos(\delta) \end{bmatrix} \qquad \textbf{(3-23)}$$

Dada una señal luminosa de entrada $StEnt$, se detectan cuatro intensidades, originadas al atravesar $StEnt$ las siguientes configuraciones:

$$i_1 = Pol(0)\cdot StEnt \qquad \textbf{(3-24)}$$

$$i_2 = Pol\left(\frac{\pi}{2}\right)\cdot StEnt \qquad \textbf{(3-25)}$$

$$i_3 = Pol\left(\frac{\pi}{4}\right)\cdot StEnt \qquad \textbf{(3-26)}$$

$$i_4 = Pol\left(\frac{\pi}{4}\right)\cdot Ret\left(\frac{\pi}{2}\right)\cdot StEnt \qquad \textbf{(3-27)}$$

A partir de las irradiancias i_1, i_2, i_3 y i_4 se pueden calcular directamente los cuatro parámetros de Stokes de la siguiente forma:

$$S_0 = i_1 + i_2 \quad \textbf{(3-28)}$$

$$S_1 = i_1 - i_2 \quad \textbf{(3-29)}$$

$$S_2 = 2i_3 - i_2 - i_1 \quad \textbf{(3-30)}$$

$$S_3 = -2i_4 + i_2 + i_1 \quad \textbf{(3-31)}$$

El código Maple correspondiente a esta simulación se muestra en el apéndice I.7.

3.7. CONCLUSIONES

En este capítulo se ha llevado a cabo una primera aproximación al estudio del retromodulador en términos de matrices de Mueller. Para ello se ha modelado matemáticamente el comportamiento de un cristal líquido y de un retromodulador. Así mismo, se han utilizado las matrices de los elementos básicos modificadores del SOP que se vieron en el capítulo 2 para completar una serie de diferentes configuraciones propuestas para el retromodulador. Haciendo uso de la potente herramienta que supone la esfera de Poincaré para visualizar estados de polarización, se ha evaluado cada una de las configuraciones y se ha concluido que la formada por una agrupación de dos células de CL presenta un gran potencial para crear constelaciones de símbolos sobre la superficie de la esfera de Poincaré y así aumentar arbitrariamente la tasa binaria ofrecida por la modulación. En el siguiente capítulo se estudiará exhaustivamente esta configuración de retromodulador ampliando el modelo de matrices de Mueller para contemplar una serie de factores que lo acercan más al comportamiento de un retromodulador experimental.

4. Simulaciones caso general

En el capítulo anterior se han ofrecido los resultados de una serie de simulaciones del sistema retrorreflector. Estas simulaciones, si bien han servido para demostrar el comportamiento básico del sistema y obtener unos resultados que satisfacen el objetivo de este proyecto, no responden a lo que cabe esperar en una prueba experimental. En el presente capítulo se tienen en cuenta una serie de características para hacer que los resultados de las simulaciones sean lo más próximos posible a los esperados con el dispositivo real que más tarde se probará.

4.1. ÁNGULO DE CONO DISTINTO A 90º

En las simulaciones del capítulo anterior se han usado sistemáticamente cristales líquidos ortocónicos, esto es, el ángulo en el que se orientan las moléculas varía en 90º entre $V_{máx}$ y $-V_{máx}$. A este ángulo se le denomina ángulo de cono, o ángulo de semicono a la mitad del ángulo, y como se verá más adelante, una célula de CL real casi nunca tendrá exactamente 90º, incluso siendo CLs ortocónicos. En cualquier caso conviene poder modificar arbitrariamente este parámetro para observar su influencia en la superficie

cubierta de la esfera de Poincaré. A continuación se muestran los resultados obtenidos tras la inclusión de este nuevo parámetro en las simulaciones, que en lo sucesivo se limitarán al modelo de retromodulador de dos CLs independientes visto en el apartado 3.5.

4.1.1. Esquema de dos CL y polarizador

En la ecuación (3-11) se introdujo la variación lineal del ángulo ϕ con la tensión aplicada. En este apartado se singulariza la ecuación para tener en consideración el ángulo de cono 2χ. Dado que las dos pantallas de cristal líquido empleadas son independientes, el semicono χ podrá valer lo mismo en ambas o tener un valor distinto, según se trate del mismo material o de otro diferente.

$$\phi = \chi \frac{V}{V_{máx}} \qquad \textbf{(4-1)}$$

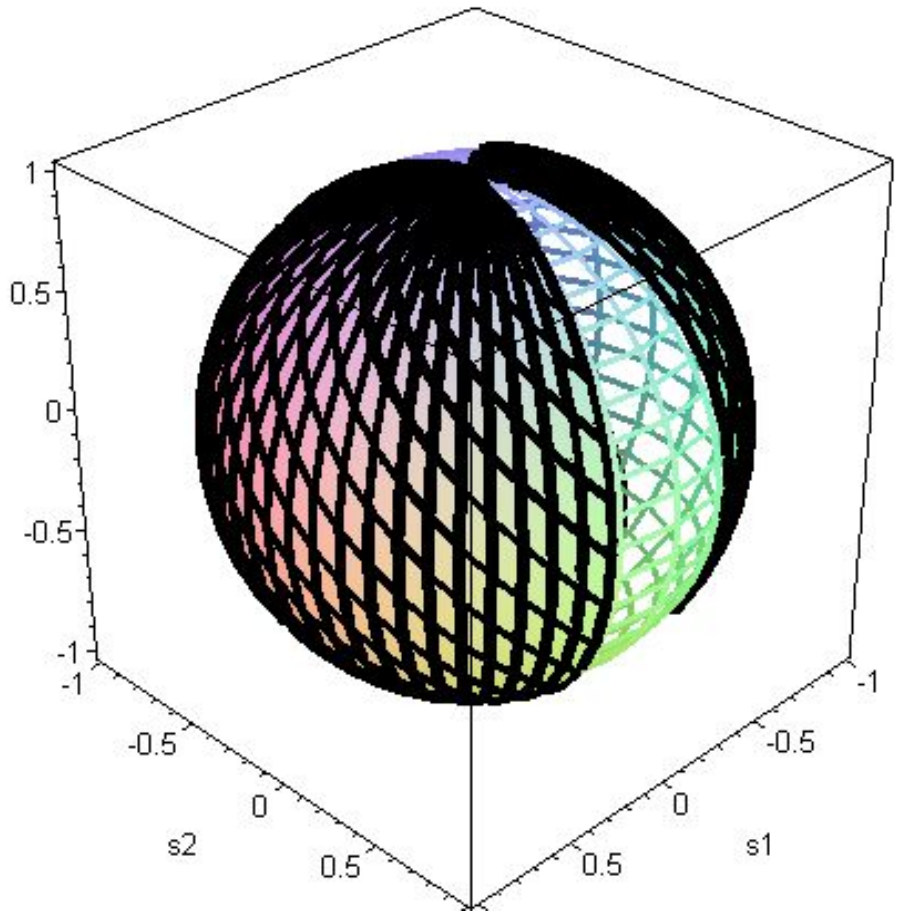


Figura 4-1. Superficie cubierta de la esfera de Poincaré para un ángulo de cono de 75º y esquema con polarizador.

En la Figura 4-1 y en la Figura 4-2 se muestra en dos perspectivas diferentes la superficie cubierta de esfera de Poincaré para un ángulo de cono de 75º.

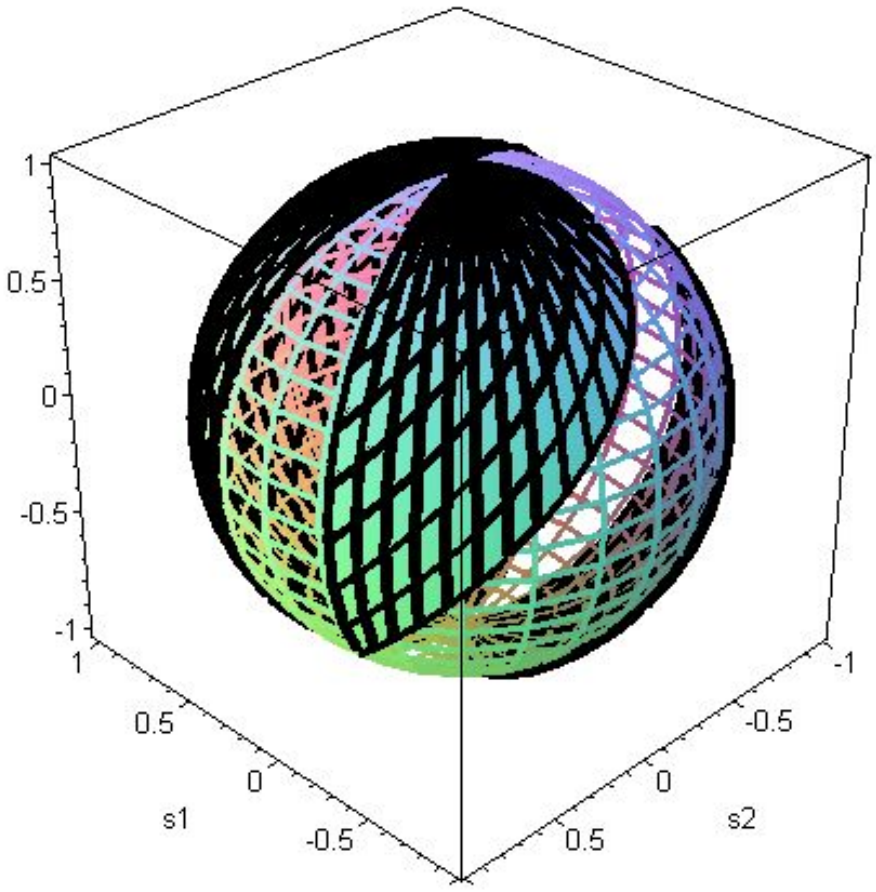


Figura 4-2. Otra perspectiva de la superficie cubierta de la esfera de Poincaré para un ángulo de cono de 75º y esquema con polarizador.

Como se puede comprobar, la superficie cubierta de la esfera de Poincaré disminuye dramáticamente con el ángulo de cono, lo que se traduce en un menor número de símbolos que es posible utilizar y por tanto, en una menor tasa binaria. De este resultado se concluye que en la medida de lo posible conviene usar materiales cuasiortocónicos lo más cercanos a 90º posible.

El código Maple correspondiente a esta simulación se muestra en el apéndice I.8.

4.1.2. Esquema de dos CL sin polarizador

En la Figura 4-3 se muestra el resultado de la simulación de la superficie cubierta para un ángulo de cono de 75º. De igual forma que en el apartado anterior, se observa una disminución de la superficie de esfera cubierta al no ser el CL ortocónico.

De estas simulaciones generadas con ángulos de cono distintos a 90º puede extraerse otra conclusión. En el caso ideal, visto en los apartados 3.5.1 y 3.5.2, el resultado obtenido en términos de superficie cubierta era idéntico, siendo las configuraciones del retromodulador distintas. Esta similitud era únicamente debida a la idealidad de las condiciones en que se basó la simulación. En estas nuevas simulaciones

se comprueba que al introducir características no ideales, las dos configuraciones ofrecen distintos comportamientos, que se podrán evaluar a la hora de optar por una u otra en la implementación del retromodulador experimental.

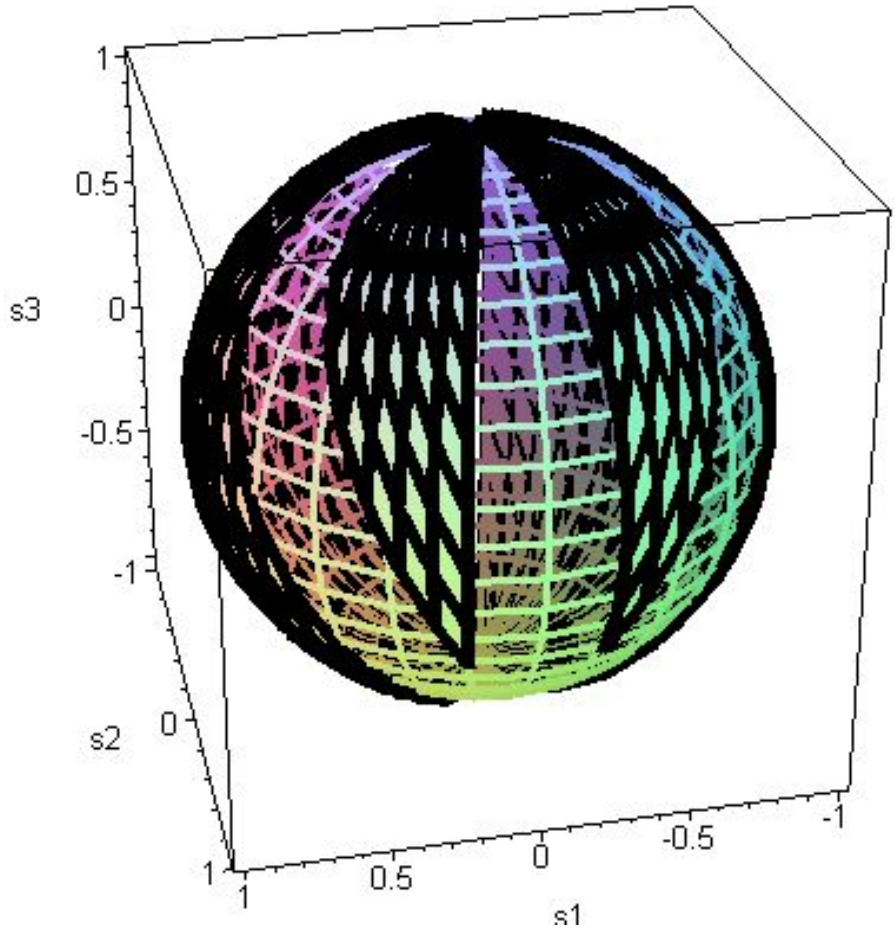


Figura 4-3. Superficie cubierta de la esfera de Poincaré para un ángulo de cono de 75º y esquema sin polarizador.

El código Maple correspondiente a esta simulación se muestra en el apéndice I.9.

4.1.3. Sin polarizador y con diferente alineamiento entre células

Hasta ahora las pantallas de CL se han alineado de forma paralela entre sí, es decir, el eje óptico se ha alineado con el mismo ángulo en ambas células. En la elección de la configuración del retromodulador, el ángulo de alineamiento entre las pantallas se revela como otro parámetro adicional de diseño. En las simulaciones será necesario cambiar la ecuación de ϕ por la siguiente:

$$\phi = \zeta + \chi \frac{V}{V_{máx}} \qquad \textbf{(4-2)}$$

donde ζ representa al ángulo de alineamiento de la célula de CL, que podrá tener un valor distinto para cada una de las pantallas, según se establezca su orientación.

En la configuración del apartado anterior, en que se eliminó el polarizador, se comprueba que la distribución de la superficie cubierta de la esfera es desigual o poco simétrica. Esta desproporción haría que los símbolos de la constelación, o los SOPs que los representan en la esfera, no pudieran distribuirse equidistantemente, quedando los SOPs adyacentes de la parte menos cubierta más próximos entre sí. Una mayor proximidad entre símbolos se traduce en una mayor dificultad en su detección en el receptor, por lo que interesaría que, manteniendo la misma superficie de esfera cubierta, ésta estuviera distribuida de forma más simétrica. Una forma de lograr esto es modificando el alineamiento entre las células. En la Figura 4-4 se muestra el resultado de la misma simulación del 4.1.2 pero con la pantalla de CL más próxima al retrorreflector rotada un ángulo de 65º. Se comprueba que se obtiene una distribución más regular sobre la esfera de Poincaré. Ambas esferas se han representado con la misma perspectiva para poder comparar.

El código Maple correspondiente a esta simulación se muestra en el apéndice I.10.

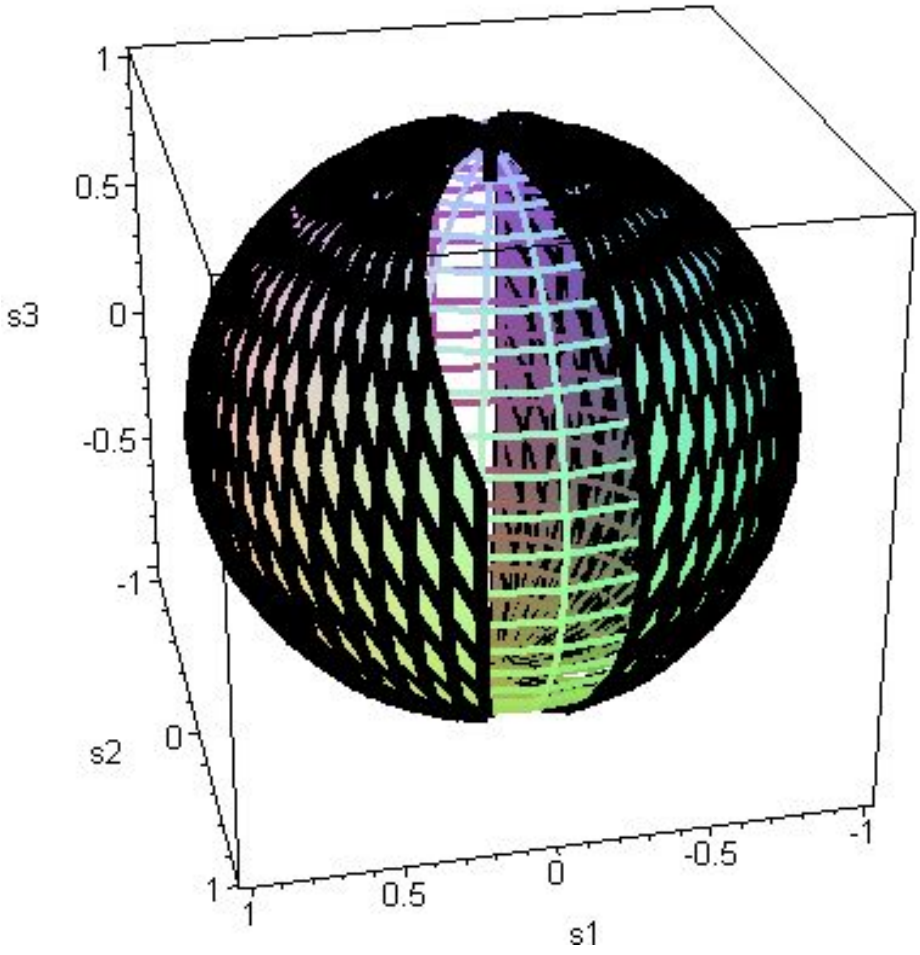


Figura 4-4. Superficie cubierta de la esfera de Poincaré para un ángulo de cono de 75º y un alineamiento entre células de 65º.

4.2. MODELO AMPLIADO DEL CL

En el apartado 3.1 se introdujo el modelo matricial de una célula de cristal líquido basado en parámetros ideales. Se consideró un retardo δ constante y un ángulo ϕ que variaba linealmente con la tensión aplicada. En un CL real ni δ es constante ni ϕ es lineal. Lo más conveniente sería disponer de las respuestas reales del CL en términos de δ y ϕ para poderlas incluir en la simulación a fin de obtener resultados muy próximos a la realidad.

En este apartado se describe el proceso de caracterización de las pantallas reales de CL y se muestra el funcionamiento del sistema como resultado de aplicar las respuestas reales de δ y ϕ en las simulaciones.

4.2.1. Montaje para la caracterización de las células de CL

En la Figura 4-5 se muestra el montaje sobre mesa antivibratoria en cámara oscura llevado a cabo para la caracterización de las células de CL.

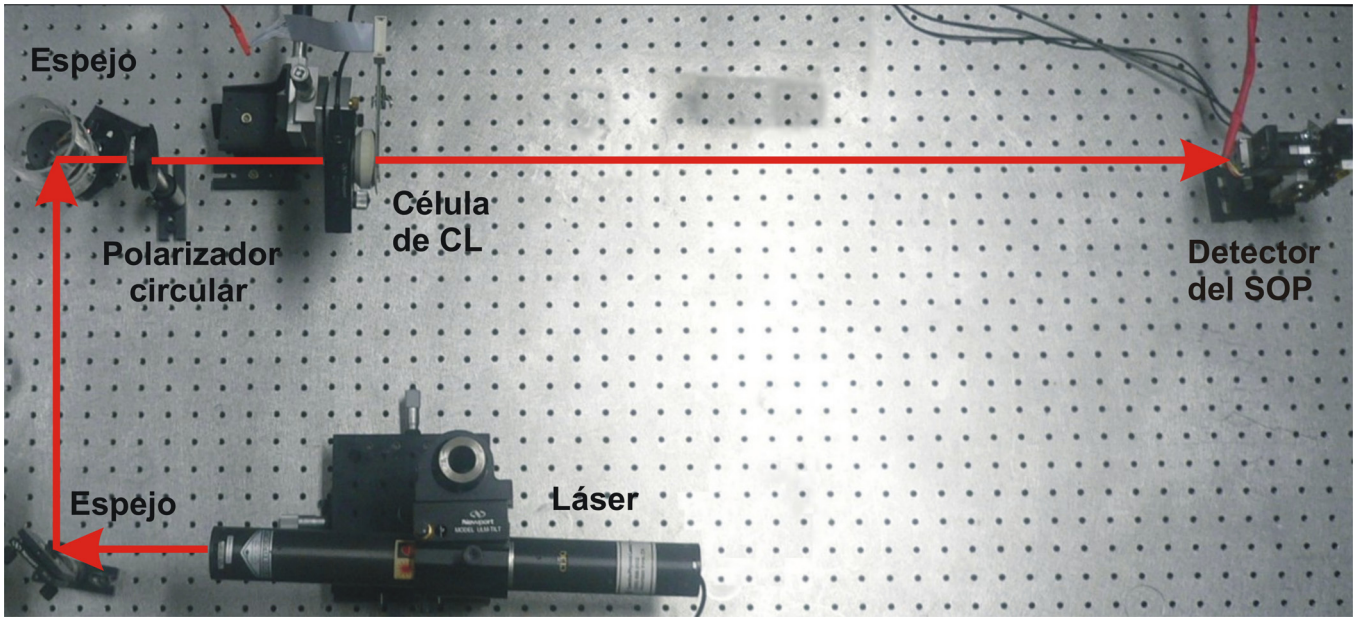


Figura 4-5. Banco de pruebas para caracterización de células de CL.

El montaje consiste en un láser de Helio-Neón que emite un haz polarizado verticalmente que, tras pasar por un polarizador circular, atraviesa perpendicularmente la célula de CL a caracterizar (Figura 4-6), recibiéndose en un detector del SOP. Todo el sistema es controlado desde un ordenador con un programa desarrollado en el entrono LabVIEW de *National Instruments*. Desde este programa se genera un barrido de tensiones discretas comprendidas entre -10V y 10V con el que se ataca al CL y se recibe la señal del detector del SOP a partir de la cual se calculan los parámetros de Stokes.

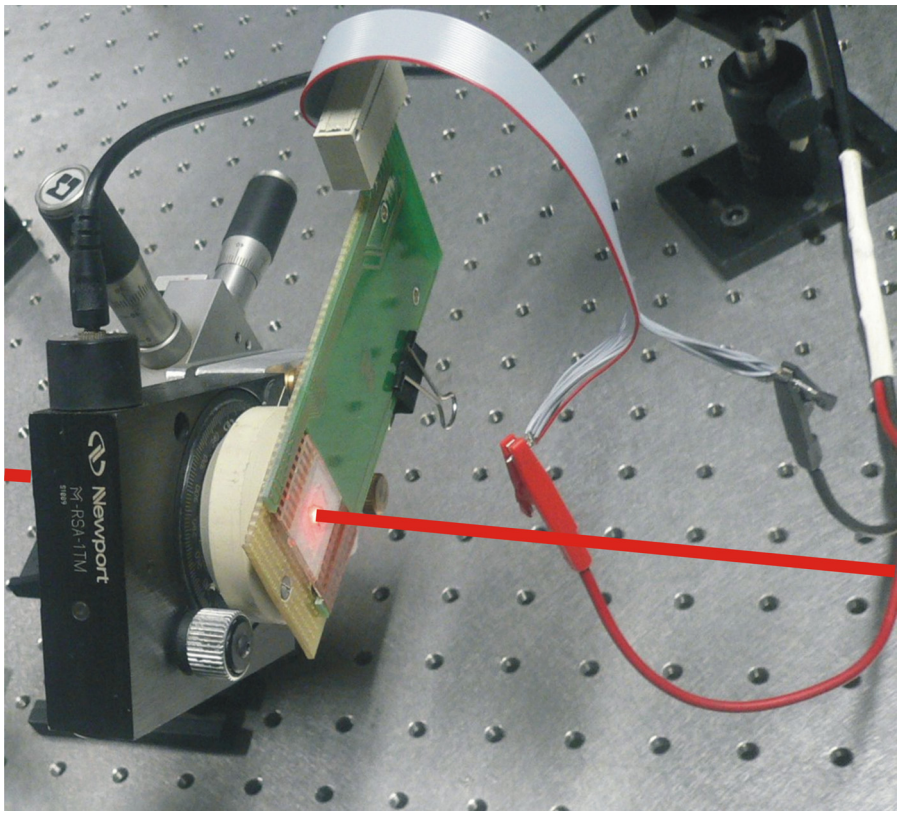


Figura 4-6. Detalle de la célula de CL alimentada por una tensión variable.

El detector del SOP (Figura 4-7) ha sido desarrollado en el laboratorio y está compuesto por un fotodetector PIN de silicio precedido por un disco giratorio que consiste en un polarizador circular (formado por un polarizador lineal seguido de una lámina cuarto de onda) cortado por la mitad y una de las caras girada 180º. De esta forma se obtiene un polarizador circular en la mitad del disco y uno lineal en la otra mitad. La señal obtenida tras atravesar este dispositivo se analiza en los dos intervalos correspondientes al paso a través de cada mitad del disco y de ambas señales se puede deducir los parámetros de Stokes tras una serie de cálculos [26] y un proceso de calibración inicial.

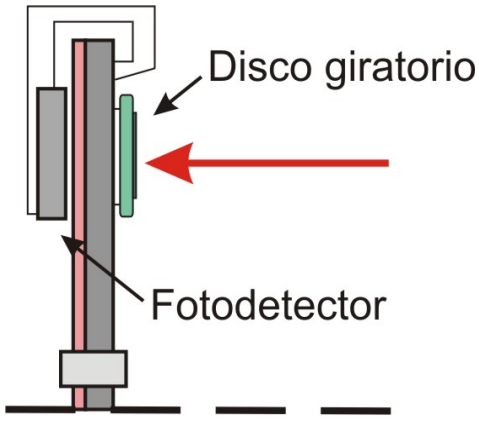


Figura 4-7. Detector del SOP.

4.2.2. Procedimiento para la caracterización

Con el montaje descrito en el apartado anterior es posible realizar de forma automática un barrido de tensiones aplicadas a cada célula de CL a caracterizar y capturar los parámetros de Stokes correspondientes a cada una de las tensiones. Una vez capturados

dichos parámetros para varios tipos distintos de CL, el procedimiento de caracterización se basa en una serie de cálculos explicados a continuación.

Los parámetros con los que en último término interesa caracterizar al CL son δ y ϕ. Como punto de partida se tienen los parámetros de Stokes de la luz de entrada al cristal líquido y los de la luz de salida deducidos con las medidas del detector de SOP. Asimismo se conoce de antemano el comportamiento que tendrá el SOP de entrada a través de un SmV hasta llegar al SOP de salida, en términos de movimientos en la esfera de Poincaré, (Figura 4-8) cuando se va recorriendo todo el rango de tensiones aplicadas que admite.

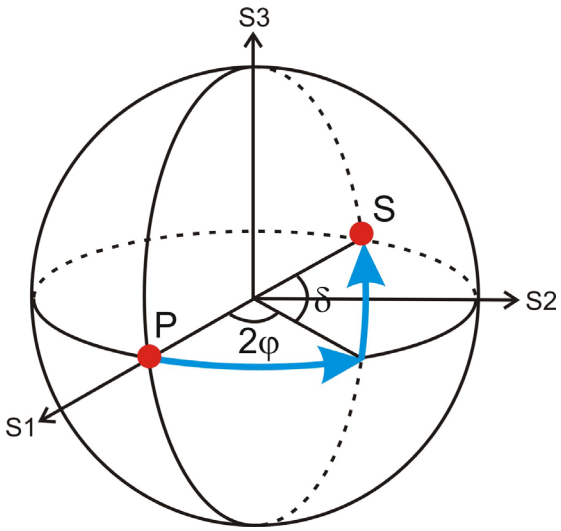


Figura 4-8. Movimiento del SOP.

Por lo tanto, utilizando una serie de cálculos vectoriales se puede deducir fácilmente [27] cuales serán las expresiones que permiten calcular los ángulos δ y ϕ partiendo de los puntos S y P, expresados en términos de parámetros de Stokes s_1, s_2 y s_3:

$$\phi = \arctan\left(\frac{s_1}{s_2}\right) \qquad \textbf{(4-3)}$$

$$\delta = \operatorname{arcsen}\left(s_3\right) \qquad \textbf{(4-4)}$$

Aplicando dichas ecuaciones a los resultados capturados por el detector del SOP, se pueden obtener las curvas correspondientes a δ y ϕ para cada tipo de CL que se desea caracterizar.

4.2.3. Resultados de la caracterización

Tras llevar a cabo la caracterización de los CLs W212, X119C y 207 se eligió como mejor opción el material experimental W212 por proporcionar unos ángulos de cono más

cercanos a 90º y presentar una mayor estabilidad con las condiciones externas. En la Figura 4-9 se muestran los parámetros de Stokes medidos con este CL al llevar a cabo un barrido de tensiones aplicadas desde -8V hasta 8V. Se puede considerar que el margen eficaz de funcionamiento del CL se situa entre -6V y 6V.

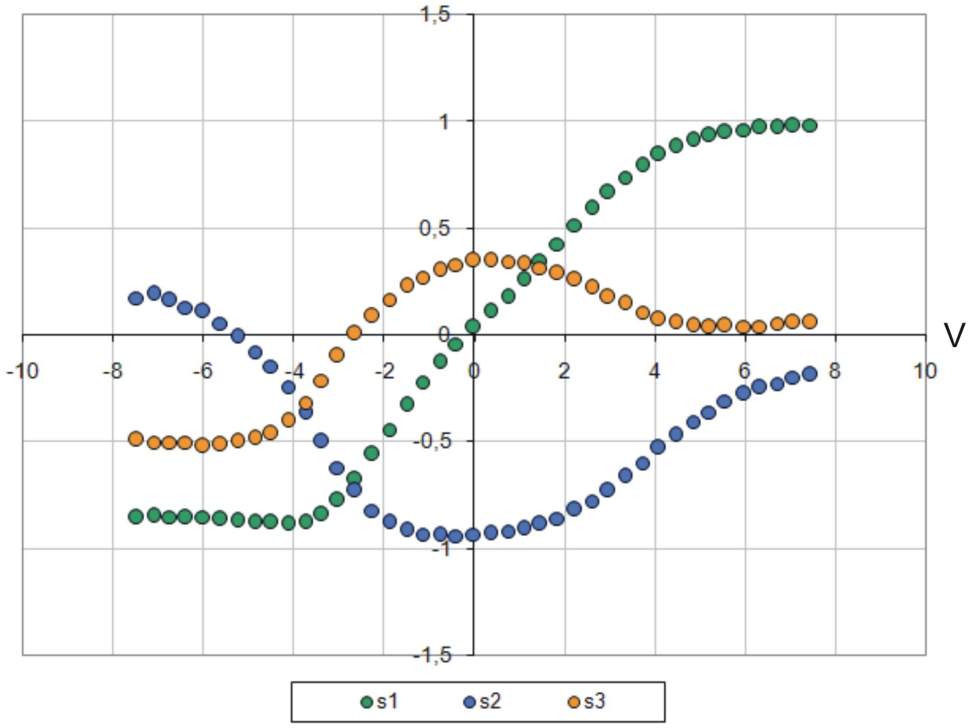


Figura 4-9. Parámetros de Stokes medidos para diferentes tensiones aplicadas al CL W212.

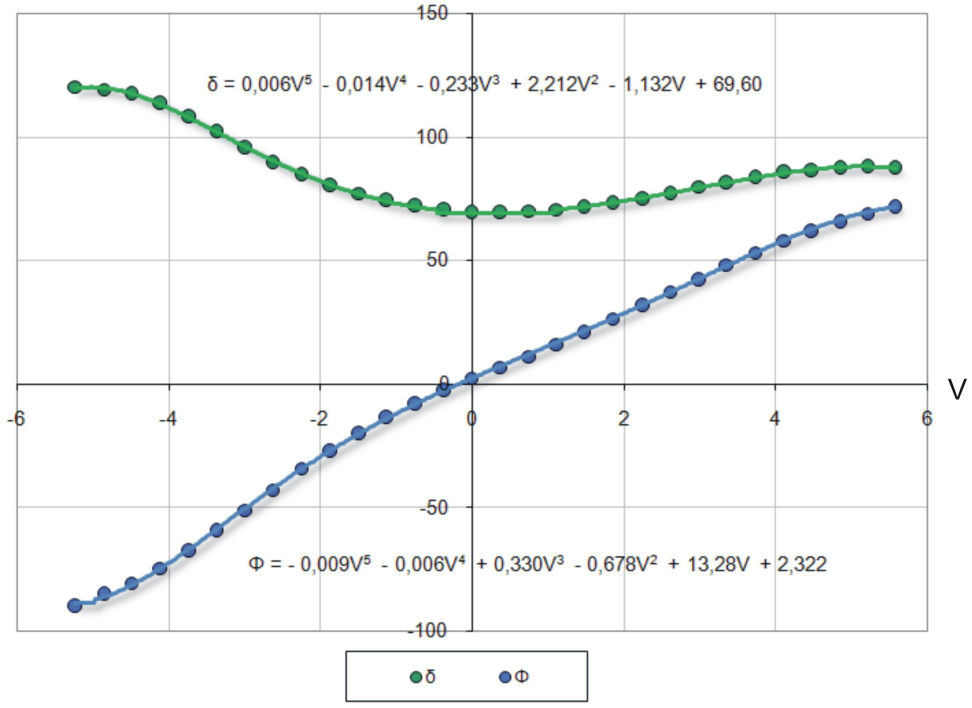


Figura 4-10. δ y Φ deducidos a partir de las medidas de los parámetros de Stokes del CL W212.

Utilizando las ecuaciones (4-3) y (4-4) se deducen las curvas reales de este CL para δ y ϕ, que pueden verse en la Figura 4-10. También se muestran las ecuaciones de δ y ϕ correspondientes a regresiones polinómicas de quinto grado que, como se ve, se adaptan correctamente a la curva real.

4.2.4. Simulaciones con el modelo ampliado y con polarizador

Una vez obtenidas las ecuaciones de δ y ϕ que modelan el comportamiento real del CL, es posible incluirlas en las simulaciones en lugar de sus correspondientes ideales. De esta forma se puede obtener una aproximación más fiable al estudio del comportamiento del retromodulador.

En la Figura 4-11 se muestra la superficie de esfera de Poincaré que es posible cubrir utilizando el modelo ampliado de CL W212 y la configuración de retromodulador sin polarizador.

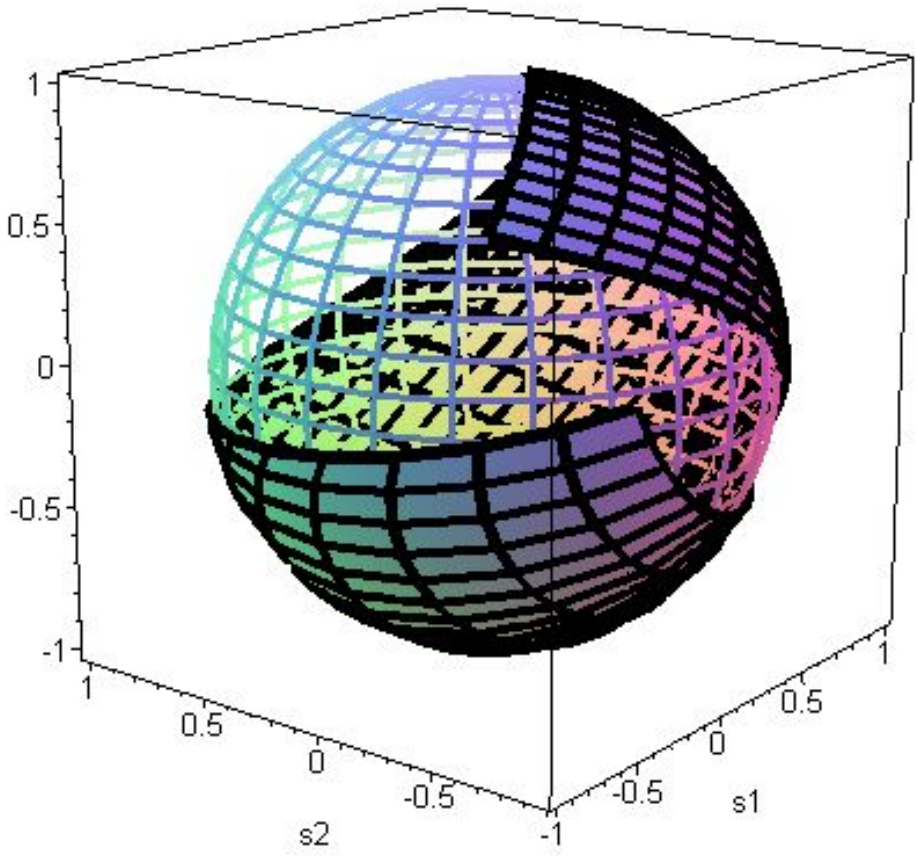


Figura 4-11. Superficie cubierta de la esfera de Poincaré para modelo ampliado de CL W212 y polarizador.

La superficie cubierta en este caso es deliberadamente escasa debido a la aparición de otro parámetro de diseño adicional. Con el modelo ampliado de CL surge el problema de que si se aplica al CL todo el rango de tensiones posibles aparecen zonas de

solapamiento a las que se llega con distintas combinaciones de tensiones. En la Figura 4-12 se muestra otra perspectiva de la esfera basada en la misma simulación en la que se aprecia este solapamiento. Es imprescindible evitar estos solapes ya que si un SOP, que representa un símbolo a transmitir, puede generarse con dos combinaciones de voltajes diferentes, no habrá manera de distinguir cual lo generó, con lo que esas zonas se convierten en inservibles en lo referente a situar símbolos sobre ellas.

La solución a este problema es encontrar un compromiso entre superficies solapadas y sin solapar, que se consigue ajustando el rango total de tensiones aplicadas al CL por debajo del máximo posible. En este caso uno de los CL está siendo atacado con un margen de ±2V y el otro con uno de aproximadamente ±4V. El fenómeno de los solapamientos puede entenderse fácilmente si se observa la Figura 4-10, en la que se puede apreciar un aumento del retardo δ al aumentar la tensión, llegando a superar los 90º al aplicar voltajes negativos por encima de -3V.

El código Maple correspondiente a esta simulación se muestra en el apéndice I.11.

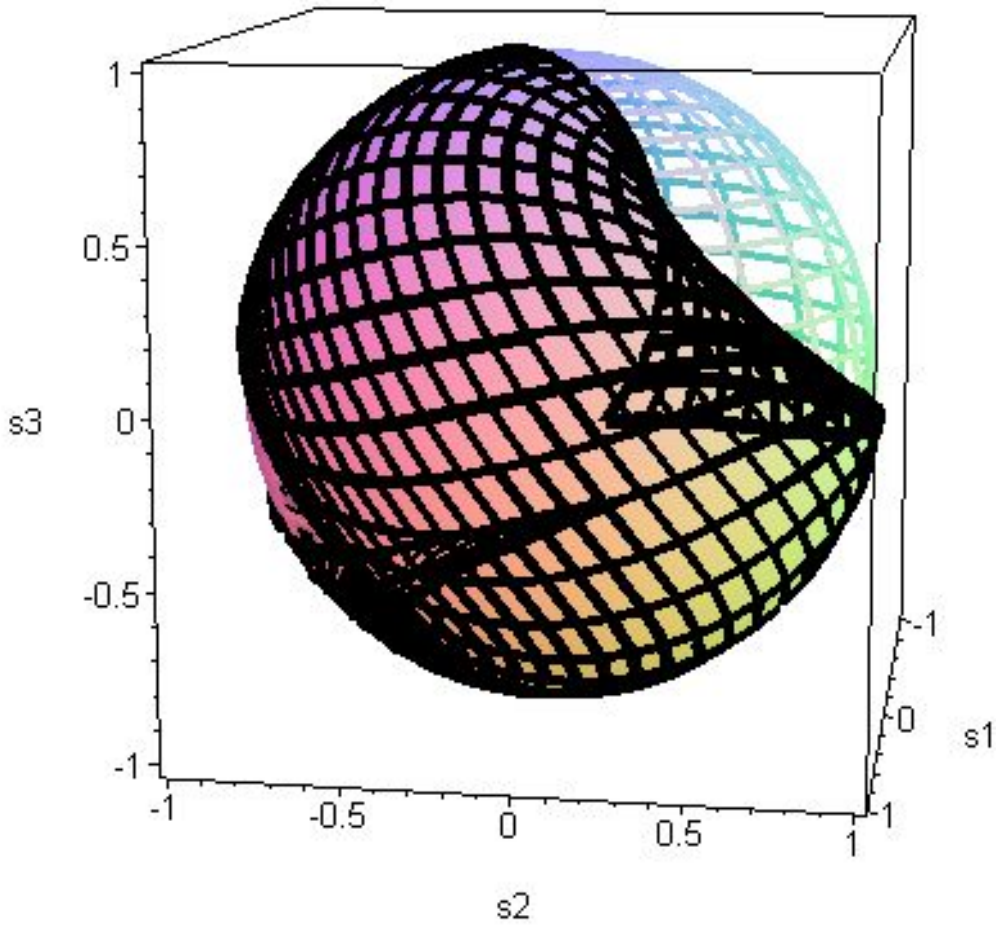


Figura 4-12. Solapamientos en la superficie cubierta de la esfera de Poincaré para modelo ampliado de CL W212 y polarizador.

4.2.5. Simulaciones con el modelo completo y sin polarizador

En la Figura 4-13 se muestra la superficie de esfera que es posible cubrir utilizando el modelo completo de CL y la configuración de retromodulador con polarizador.

En este caso cabe el mismo comentario que en el apartado anterior respecto a los solapamientos. Es necesario disminuir el rango total de voltaje aplicado con el fin de mantener la máxima superficie posible sin solapar. Como consecuencia directa de la curva real de retardo, las tensiones negativas se han mantenido por debajo de -3V a fin de que el CL no genere retardos mayores de 90º.

Además, tras realizar varias pruebas, se ha comprobado que girando 90º la pantalla de entrada del retromodulador se consigue una distribución de la superficie alcanzable más homogénea. Este parámetro es posible modificarlo en la curva real de ϕ en la simulación sin más que sumar 90º al término constante de la ecuación que describe la variación de ϕ de una de las células de CL.

Se comprueba con estas simulaciones que la opción más eficiente en términos de mayor homogeneidad y de máxima superficie cubierta sin solapar de esfera de Poincaré es la correspondiente a la configuración de retromodulador sin polarizador, por lo que será la opción elegida en lo sucesivo.

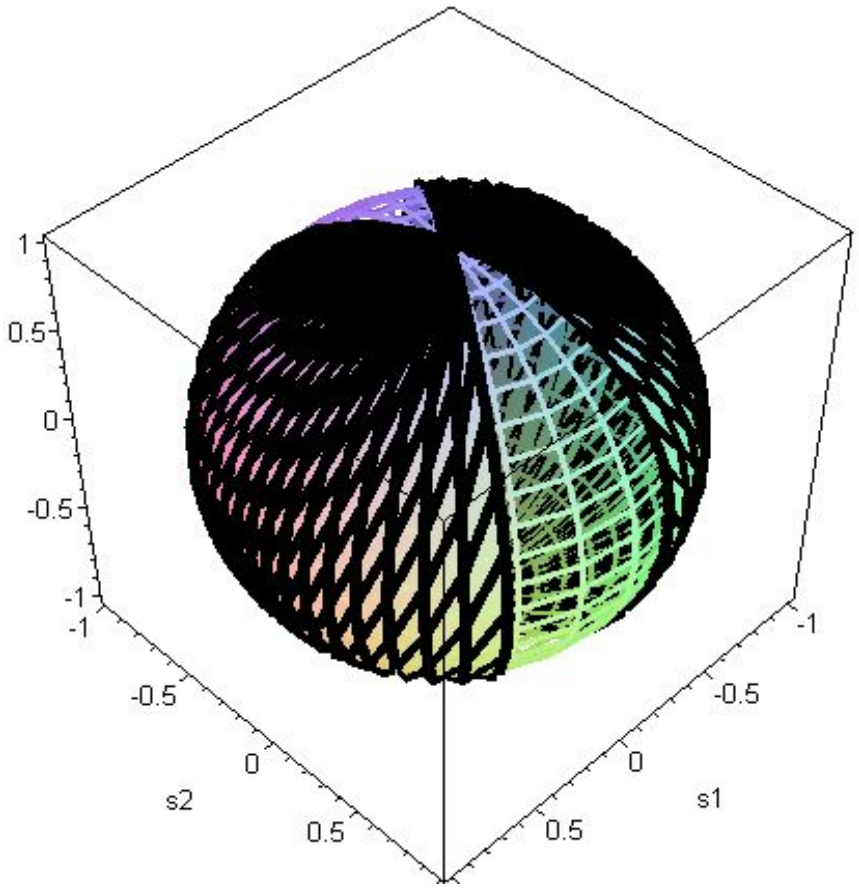


Figura 4-13. Superficie cubierta de la esfera de Poincaré para modelo ampliado de CL W212 sin polarizador.

El código Maple correspondiente a esta simulación se muestra en el apéndice I.12.

4.3. RETRORREFLECTOR EN MOVIMIENTO

En todas las simulaciones presentadas hasta ahora, el retromodulador se ha supuesto completamente inmóvil y la incidencia del láser se ha asumido perfectamente perpendicular a todos los elementos ópticos del sistema. En este escenario el retrorreflector ha actuado exactamente igual a como lo haría un espejo. Sin embargo el retromodulador es una parte móvil del sistema de comunicación por lo que estos supuestos, si bien han servido para comprender numerosos aspectos del dispositivo revelando su complejidad, no son válidos si se desea disponer de una previsión realista del funcionamiento experimental de todo el sistema.

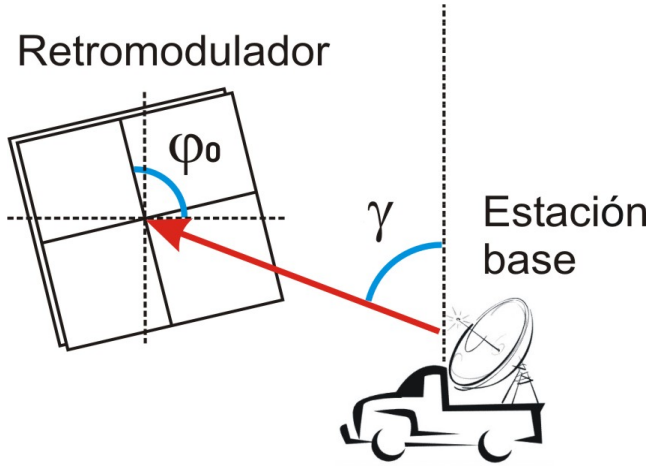


Figura 4-14. Retromodulador en movimiento libre definido por los ángulos γ y Φ.

El retromodulador se va a suponer en vuelo libre. Este movimiento, en principio arbitrario, del retromodulador se va a caracterizar por la variación de dos parámetros: γ y ϕ_0 (Figura 4-14):

- El primero de los ángulos, γ, es el ángulo cenital, que describe la elevación del retromodulador respecto a la vertical. Hasta ahora γ ha sido cero, es decir, el haz emitido perpendicular a la superficie terrestre. El rango total de variación de γ será, por lo tanto, desde 0 a π/2. Este ángulo se puede conocer en todo momento asumiendo que el láser de la estación base tiene permanentemente al retromodulador apuntado, por lo que la variación cenital se podrá medir.
- El ángulo ϕ_0 representa la orientación del retromodulador en el plano de las células de CL y en principio es aleatorio, por lo que no es posible conocerlo desde el lado del receptor.

4.3.1. Movimiento del vector director de la molécula de CL

Con el retromodulador en movimiento surge el problema de que las moléculas del CL se dispondrán en alineaciones diferentes según los ángulos γ y ϕ_0 y del voltaje aplicado (que a su vez modificará otros dos ángulos vistos a continuación), con lo que el efecto sobre el haz incidente variará con ellos y es importante conocer en qué medida y de qué forma será dicha variación.

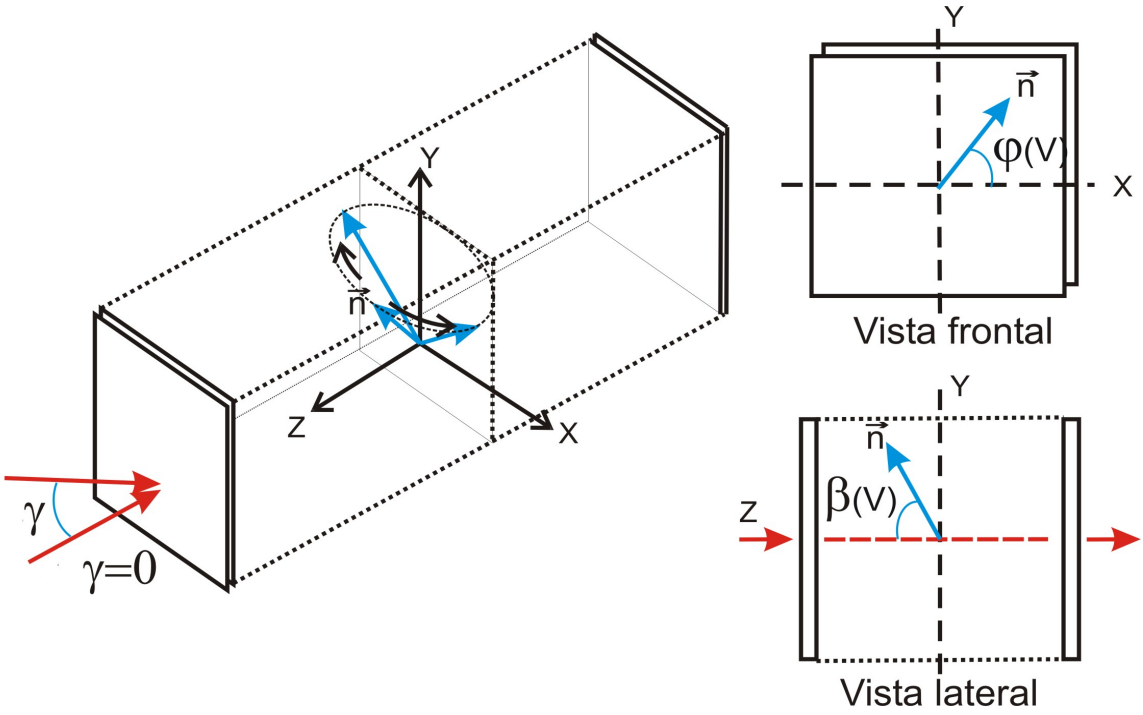


Figura 4-15. Movimiento del vector director molecular del CL.

En la Figura 4-15 se muestra el movimiento de las moléculas de CL, definido por su vector director unitario $\vec{n}$, al variar la tensión aplicada en los electrodos de la célula. Se definen dos tipos de movimientos: dentro y fuera del plano:

- El movimiento fuera del plano se puede apreciar en la vista lateral de la Figura 4-15 y viene descrito por el ángulo $\beta(V)$. En reposo (cuando $V=0$), $\vec{n}$ tiene un $\beta(V)=\pi/2-\text{ángulo de semicono}$ y cuando $V=\pm V_{máx}$, $\beta(V)=\pi/2$, es decir, $\vec{n}$ se sitúa en el plano.

- El movimiento dentro del plano se aprecia en la vista frontal de la Figura 4-15 y viene a su vez descrito por el ángulo $\phi(V)$. Asumiendo un ϕ_0 determinado, este ángulo varía entre $\phi=\phi_0$ cuando $V=0$ y $\phi=\phi_0\pm\phi_{máx}$ cuando $V=\pm V_{máx}$. El ϕ_0 representado en la Figura 4-15 es de cero, sin embargo, como se ha dicho previamente, ϕ_0 es aleatorio, por lo que el valor de ϕ que verá la luz incidente será variable.

El vector director unitario $\vec{n}$ puede definirse en el espacio mediante (4-5):

$$\vec{n} = \begin{bmatrix} \text{sen}(\beta)\cos(\phi) \\ \text{sen}(\beta)\,\text{sen}(\phi) \\ \cos(\beta) \end{bmatrix} \qquad \textit{(4-5)}$$

Al igual que se ha hecho anteriormente, la dependencia de los ángulos $\beta(V)$ y $\phi(V)$ con la tensión puede suponerse ideal o bien usar las curvas medidas experimentalmente.

4.3.2. Cambios de ejes de coordenadas y operaciones vectoriales

Como se ha visto, para incluir el efecto del movimiento libre del retromodulador en la simulación del sistema, es necesario tener en consideración cómo hacen variar al vector director $\vec{n}$ los ángulos γ y ϕ_0. Para ello se va a realizar un estudio vectorial del movimiento tridimensaional del director $\vec{n}$ según la variación de γ y ϕ_0, para lo cual es necesario realizar los cambios en los ejes de coordenadas que imponen dichas variaciones. De esta forma es posible utilizar las mismas simulaciones estudiadas anteriormente y a la vez tener en cuenta las nuevas variables.

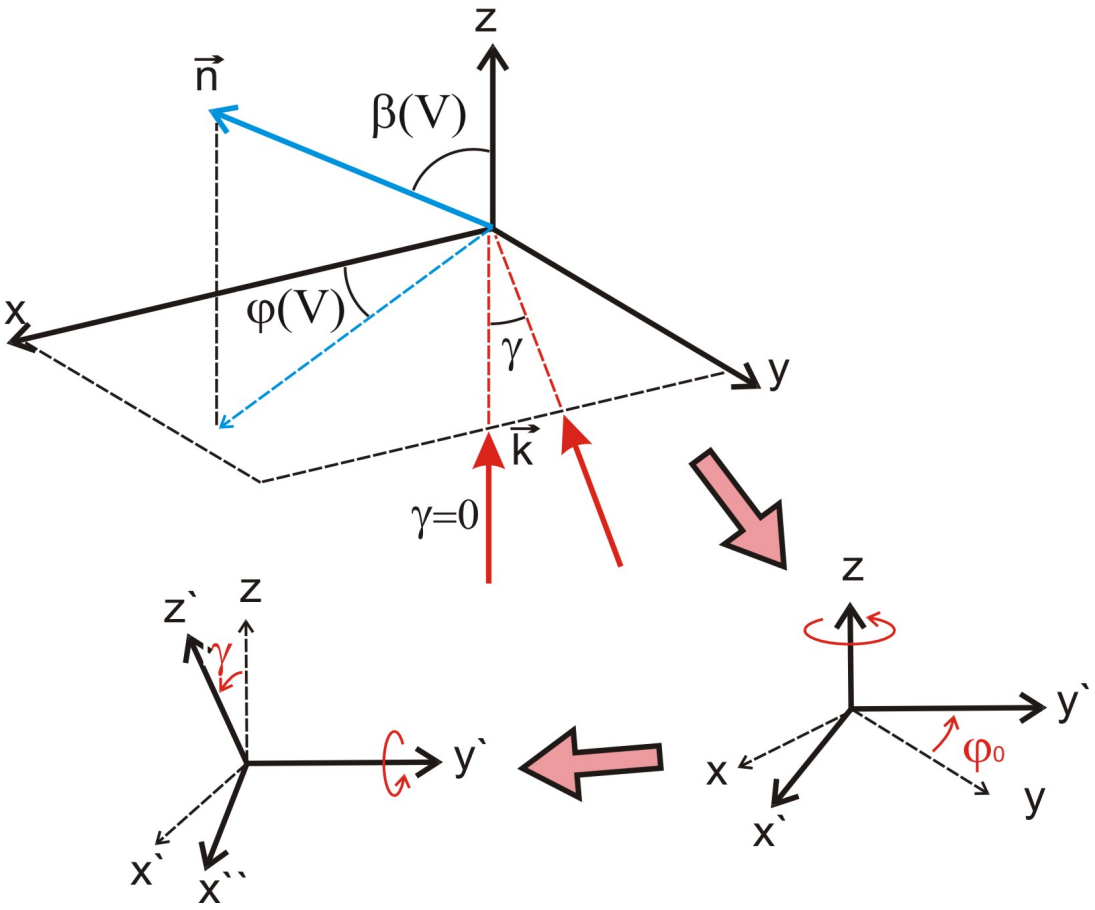


Figura 4-16. Cambios de ejes de coordenadas.

En la Figura 4-16 se muestran los dos cambios de coordenadas necesarios para tener en cuenta las dos variaciones de ángulo γ y ϕ_0. Se parte de un eje de coordenadas con su plano XY aleatoriamente orientado y con el eje z formando un ángulo de π/2 con la superficie terrestre. Para incluir el efecto de ϕ_0 es necesario realizar una rotación del eje de coordenadas x, y, z alrededor de z un ángulo de ϕ_0 dando como resultado el nuevo eje de coordenadas x', y', z. Por último, para considerar la diferencia angular del haz emitido en relación al cénit hay que hacer otra rotación, esta vez alrededor del nuevo eje y' girando un ángulo igual a γ generando el eje de coordenadas x'', y', z'.

$$ROTz(\phi) = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & -\operatorname{sen}(\phi) & 0 \\ \operatorname{sen}(\phi) & \cos(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad \textbf{(4-6)}$$

$$ROTy(\phi) = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & 0 & -\operatorname{sen}(\phi) \\ 0 & 1 & 0 \\ \operatorname{sen}(\phi) & 0 & \cos(\phi) \end{bmatrix} \qquad \textbf{(4-7)}$$

Las ecuaciones (4-6) y (4-7) servirán para aplicar respectivamente la rotación en el espacio según el eje z o y al vector $\vec{n}$.

Por otra parte, el vector unitario $\vec{k}$ representa al vector director del haz incidente, marca la dirección de la luz que atraviesa la célula y queda definido por la ecuación (4-8).

$$\vec{k} = \begin{bmatrix} \operatorname{sen}(\gamma) \\ 0 \\ \cos(\gamma) \end{bmatrix} \qquad \textbf{(4-8)}$$

El ángulo θ es el definido entre el vector de la luz incidente $\vec{k}$ y el vector director de las moléculas de CL $\vec{n}$. Para calcular el ángulo entre dos vectores $\vec{n}$ y $\vec{k}$ se usa la ecuación (4-9).

$$\theta = \arccos\left(\frac{\vec{n}\cdot\vec{k}}{|\vec{n}|\cdot|\vec{k}|}\right) = \arccos\left(\frac{n_x k_x + n_y k_y + n_z k_z}{\sqrt{n_x{}^2 + n_y{}^2 + n_z{}^2}\cdot\sqrt{k_x{}^2 + k_y{}^2 + k_z{}^2}}\right) \qquad \textbf{(4-9)}$$

Dado que $\vec{n}$ y $\vec{k}$ son vectores unitarios, el cálculo de θ se reduce al arcocoseno del producto escalar de los vectores. Este ángulo contiene todas las variaciones consideradas, al depender de $\vec{n}$ y $\vec{k}$, que a su vez dependen de $\beta(V)$, $\phi(V)$, ϕ_0 y γ.

Por último, el ángulo α define la orientación del vector $\vec{n}_{rot}$ en el plano de birrefringencia, que es el mismo vector $\vec{n}$ pero en el eje de coordenadas x'', y', z' (tras

las rotaciones). Este ángulo también depende de todas las variaciones consideradas: $\beta(V)$, $\phi(V)$, ϕ_0 y γ.

$$\alpha = \arctan\left(-\frac{\vec{n}_{rot\ y}}{\vec{n}_{rot\ x}}\right) \qquad \textbf{(4-10)}$$

4.3.3. Influencia de las variaciones angulares en el retromodulador

El objetivo de todas las variaciones angulares estudiadas es comprender la influencia que tienen todos los movimientos en el espacio que sufre el retromodulador en su comportamiento con la luz que lo atraviesa. Esta influencia se traducirá en cambios en la birrefringencia del CL (mediante el ángulo θ) y en cambios en la orientación del plano de birrefringencia (mediante el ángulo α).

En el caso de la influencia de α, se observa directamente al ser α el argumento del rotador incluido en el modelo de retromodulador. Lo que falta es encontrar la relación entre el retardo, que es el argumento del retardador del modelo del retromodulador, y los ángulos vistos. Estos movimientos angulares se trasladan a cambios en la birrefringencia presentada por el CL, que se traducen en variaciones del retardo provocado a la luz que atraviesa las células. Esta importante dependencia del retardo δ con la birrefringencia Δn viene definida por la siguiente ecuación:

$$\delta = d\cdot\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)\cdot\Delta n \qquad \textbf{(4-11)}$$

donde d representa el grosor de la célula de CL y λ la longitud de onda.

La birrefringencia Δn es la capacidad del CL de ofrecer dos índices de refracción distintos: extraordinario n_e y ordinario n_o, también conocidos como eje lento y rápido respectivamente, y se define como:

$$\Delta n = n_e - n_o \qquad \textbf{(4-12)}$$

En la práctica el eje de refracción que realmente interesa es el efectivo n_{eff}, el que físicamente ve la luz a su paso por la célula de CL, que viene dado por la siguiente expresión [27]:

$$n_{eff} = \sqrt{\frac{1}{\frac{\text{sen}^2(\theta)}{n_e^{\,2}} + \frac{\cos^2(\theta)}{n_o^{\,2}}}} \qquad \textbf{(4-13)}$$

Así se obtiene una relación directa entre los ángulos vistos en los apartados anteriores y el retardo inducido por el CL, ya que los parámetros intermedios λ, d, n_e y n_o son datos constantes y conocidos. A continuación se describe cómo los ángulos

influyen en n_{eff} para mayor comprensión de su comportamiento. En general, todo movimiento que haga a $\vec{n}$ realizar un movimiento fuera del plano, tendrá como consecuencia la disminución de n_{eff} desde un valor de n_e:

- Si $\gamma = 0$, en incidencia perfectamente perpendicular, n_{eff} será máximo ($n_{eff} = n_e$) cuando $\vec{n}$ no se salga del plano, es decir, cuando $V = \pm V_{máx}$, o $\beta(V) = \pi/2$. Cuando $\beta(V) < \pi/2$, $\vec{n}$ se sale del plano y su proyección en el plano (n_{eff}) es un valor menor al de n_e (Figura 4-17). En el caso de $\gamma = 0$ el valor de ϕ_0 o ϕ es irrelevante ya que la proyección será la misma sea cual sea la orientación del retromodulador alrededor de la dirección de incidencia.

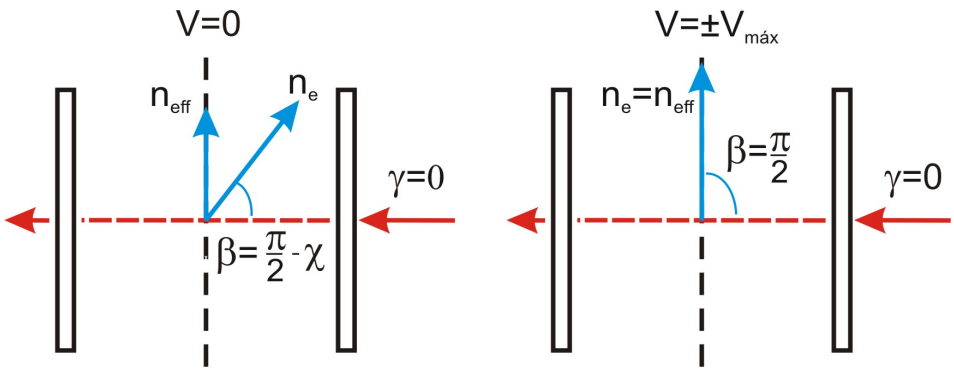


Figura 4-17. Comportamiento del índice de refracción para diferentes β y Φ con γ=0.

- Si $\gamma \neq 0$, el vector $\vec{n}$ siempre estará fuera del plano perpendicular a la propagación excepto si se da el caso de que $\gamma = \beta$ y $\phi = \pi/2$, en cuyo caso $n_{eff} = n_o$. El otro caso extremo, ya con $\vec{n}$ fuera del plano, se encuentra cuando $\phi = 0$ y $\gamma = \pi/2 - \beta$, en el que $n_{eff} = n_e$. En cualquier otra situación $\vec{n}$ se encontrará fuera del plano, por lo que la proyección de n_e dará lugar a un $n_{eff} < n_e$ (Figura 4-18).

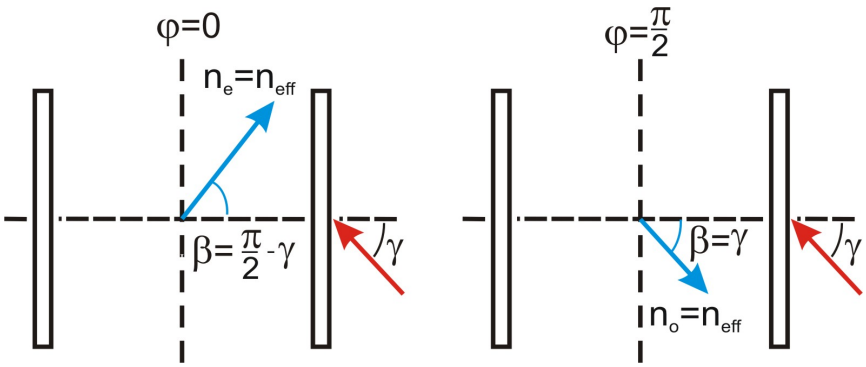


Figura 4-18. Comportamiento del índice de refracción para diferentes β y Φ con γ≠0.

4.3.4. Álgebra de Jones

Para el resto de simulaciones se ha optado por el emplo de matrices de Jones de 2×2 en lugar de las matrices de Mueller de 4×4 debido a que la gran cantidad de variables incrementan la complejidad de los cálculos necesarios, lo que se traduce en un gran aumento del tiempo necesario para llevar a cabo las simulaciones. Las matrices necesarias para el modelo de las células de CL son las descritas en las ecuaciones (4-14) y (4-15). El modelo basado en el rotador y retardador es idéntico al de las matrices de Mueller.

$$ROT(\phi) = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & -\operatorname{sen}(\phi) \\ \operatorname{sen}(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix} \tag{4-14}$$

$$RET(\delta) = \begin{bmatrix} e^{-j\frac{\delta}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-j\frac{\delta}{2}} \end{bmatrix} \tag{4-15}$$

$$CL(\phi,\delta) = ROT(\phi)\cdot RET(\delta)\cdot ROT(-\phi) \tag{4-16}$$

El modelo de retrorreflector se muestra en la ecuación (4-17) y es idéntico al modelo de un espejo. Un retromodulador se comporta como un espejo con haces en incidencia perfectamente perpendicular, ya que es el único caso en que el espejo devuelve la luz en la misma dirección en la que incide. En este caso la equiparación es correcta dado que se han llevado a cabo los cambios de ejes de coordenadas con el objetivo de que, en términos de matrices de Jones, la incidencia sea perpendicular.

$$RR = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4-17}$$

Por último, el modelo final del retromodulador usado en las simulaciones ha sido el de la ecuación (4-18):

$$RM(\phi,\delta) = CL(-\phi_1,\delta_1)\cdot CL(-\phi_2,\delta_2)\cdot RR\cdot CL(\phi_2,\delta_2)\cdot CL_1(\phi_1,\delta_1) \tag{4-18}$$

Una vez obtenido el vector de Jones final, su conversión al álgebra de Mueller puede realizarse fácilmente utilizando el detector del SOP que se explicó en el apartado 3.6. En este caso la luz de entrada al detector será un vector de Jones y para emular los polarizadores se usarán las matrices equivalentes en el álgebra de Jones, obteniendo finalmente cuatro intensidades escalares, con las que la obtención de los parámetros de Stokes es directa. El código Maple correspondiente a la simulación de dicho conversor Jones-Mueller se muestra en el apéndice I.13.

4.4. RESULTADOS FINALES DE LAS SIMULACIONES

En este apartado se muestran los resultados finales de las simulaciones del caso general del sistema retromodulador incluyendo todos los efectos estudiados anteriormente. Para todas las simulaciones se ha utilizado el modelo basado en mediciones experimentales del CL W212 pero en una aproximación polinómica de grado menor debido a que la de grado cinco hacía aumentar el tiempo de simulación de una manera prohibitiva. El código Maple correspondiente al sistema completo usado en todas las siguientes simulaciones se puede ver en el apéndice I.14.

Inicialmente se procede a la elección del ángulo de desalineamiento entre células de CL más apropiado. Esta elección se basa en observar los cambios que se producen en la superficie cubierta de la esfera de Poincaré al variar los ángulos γ y ϕ_0 por separado. Por último se observa la influencia que tiene sobre la modulación las variaciones de los dos ángulos γ y ϕ_0.

4.4.1. Elección del desalineamiento ζ entre células en función de γ

Como se verá a continuación, las variaciones en cuanto a superficie de esfera de Poincaré cubierta dependen fuertemente del ángulo de alineamiento ζ entre las células de CL cuando la incidencia no es perpendicular, como se estudiaba en el capítulo 3. Esta dependencia obliga a que el primer paso sea elegir el valor más adecuado de ζ.

Superpuestos a la superficie cubierta, se han simulado cuatro SOPs correspondientes a ($V_{máx}$, $V_{máx}$), ($-V_{máx}$, $-V_{máx}$), ($+V_{máx}$, $-V_{máx}$) y ($-V_{máx}$, $V_{máx}$) para observar su evolución sobre la esfera al disminuir la superficie cubierta. Estos SOPs, representados en rojo, azul, verde y negro en las simulaciones, se corresponden con pequeñas variaciones constantes del voltaje alrededor de las combinaciones de $\pm V_{máx}$ mencionadas para conformar pequeñas superficies que se puedan distinguir de la superficie total correspondiente al rango completo.

En los apéndices II.1, II.2, II.3 y II.4 se presentan los resultados completos con γ variable para diferentes ángulos de alineamiento con el objetivo de elegir el más conveniente, que es el que maximiza la cantidad de superficie cubierta y minimiza su dependencia de γ. Tras analizar dichos resultados se puede concluir que un ángulo de desalineamiento de 30º proporciona una menor variabilidad en la superficie cubierta de la esfera de Poincaré. Como muestra, en la Tabla 4-1 se ofrecen los casos peores para los distintos valores de γ contemplados. El código Maple correspondiente a estas simulaciones se muestra en el apéndice I.15.

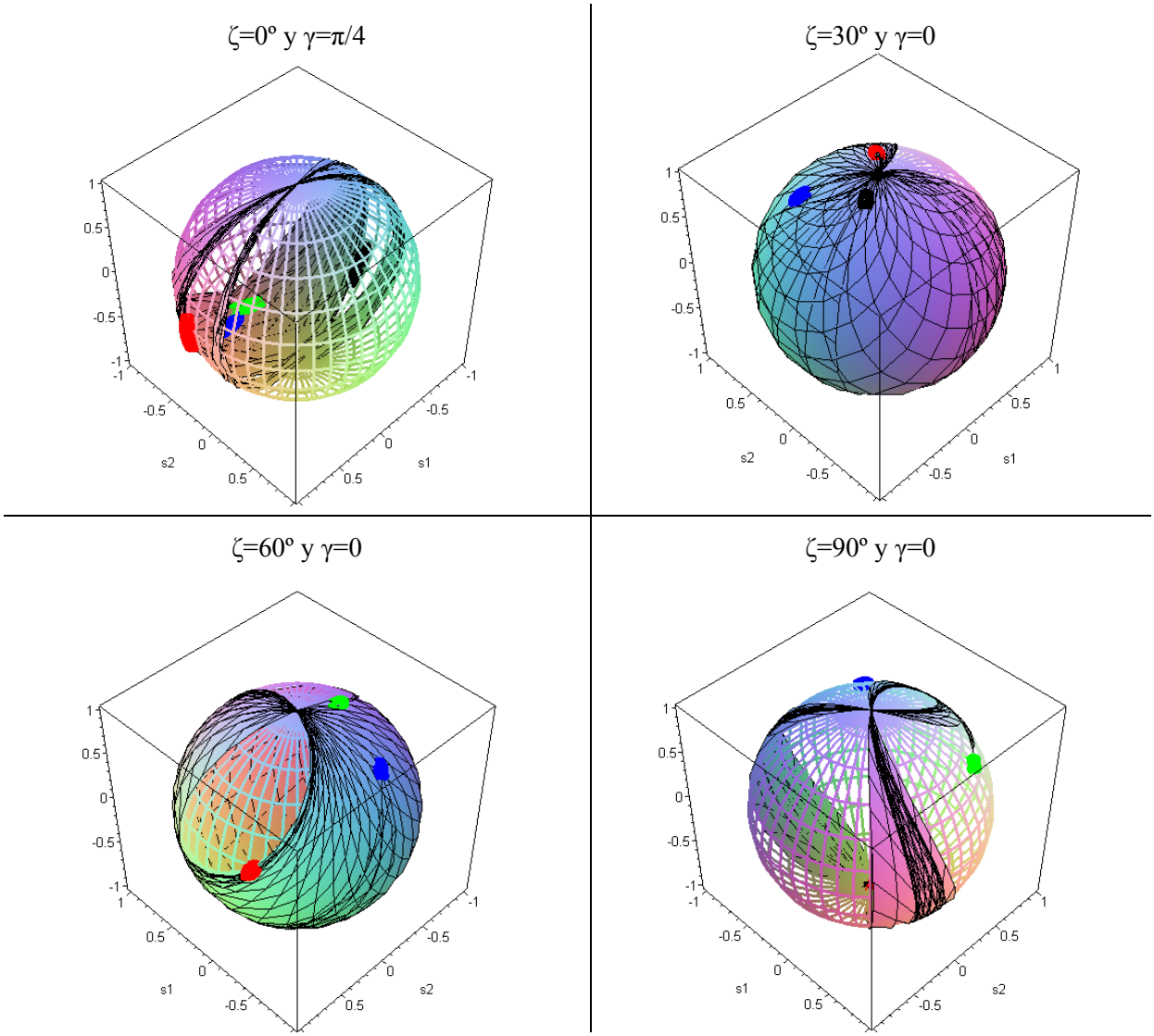


Tabla 4-1. Esfera de Poincaré cubierta para distintos valores como caso peor de ζ y γ.

4.4.2. Elección del desalineamiento ζ entre células en función de Φ_0

En el anterior apartado se observó la influencia de γ en la superficie cubierta de la esfera de Poincaré para diferentes ángulos de desalineamiento, manteniendo el ángulo ϕ_0 constante. Su influencia se estudia en este apartado. En este caso se hace lo mismo que en el anterior pero dejando γ constante y con un ϕ_0 variable.

Los resultados completos de las simulaciones pueden verse en los apéndices II.5, II.6, II.7 y II.8. En la Tabla 4-2 se muestra, al igual que en el apartado anterior, los peores casos para cada valor de ϕ_0 .

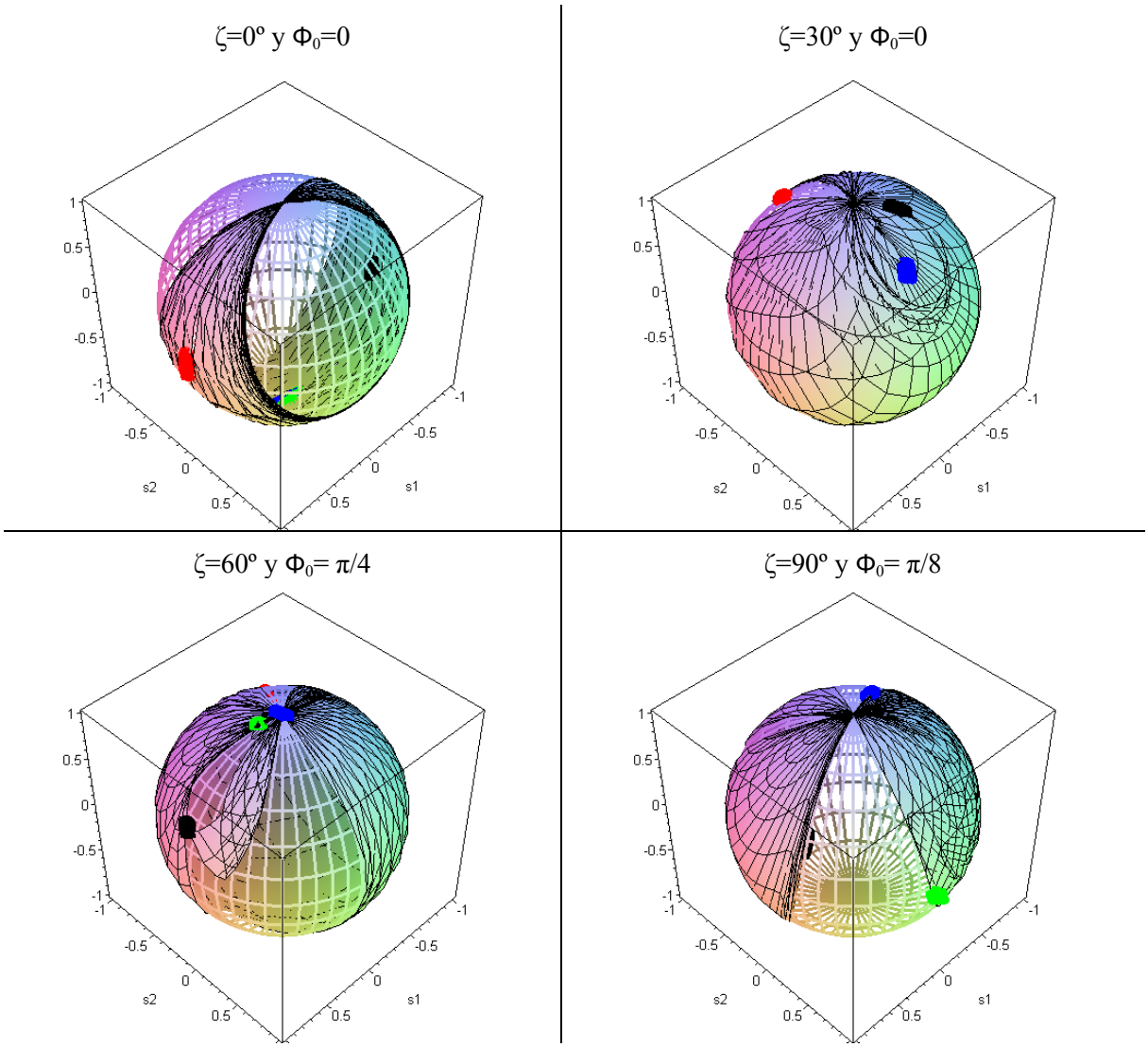


Tabla 4-2. Esfera de Poincaré cubierta para distintos valores como caso peor de ζ y Φ0.

4.4.3. Influencia conjunta de los ángulos γ y φ0

El resultado más interesante que se puede obtener de las simulaciones es observar cómo influyen en la cantidad de superficie de esfera de Poincaré cubierta (y los SOPs que se sitúen sobre ella) las variaciones conjuntas de los dos ángulos que modelan el movimiento del retromodulador: γ y ϕ_0. En este apartado se muestra esta dependencia y se destacan dos fenómenos.

Por una parte las líneas de variación de los SOPs evolucionan de forma altamente no lineal al ir variando γ y ϕ_0. En este caso se establecieron las combinaciones de tensiones necesarias para configurar una constelación de ocho SOPs aproximadamente equidistantes y para diferentes valores de ϕ_0 se dibujaron las líneas que describían la variación de los SOPs de la constelación al variar γ. En los apéndices II.9, II.10, II.11 y II.12 se puede ver la evolución de estos SOPs a lo largo de las líneas de γ para cuatro

diferentes ϕ_0. En la Figura 4-19 se observa cómo las líneas comienzan a moverse según γ y en un determinado momento se ve cómo seis de los SOPs, anteriormente separados, se colapsan en una zona muy pequeña de la esfera.

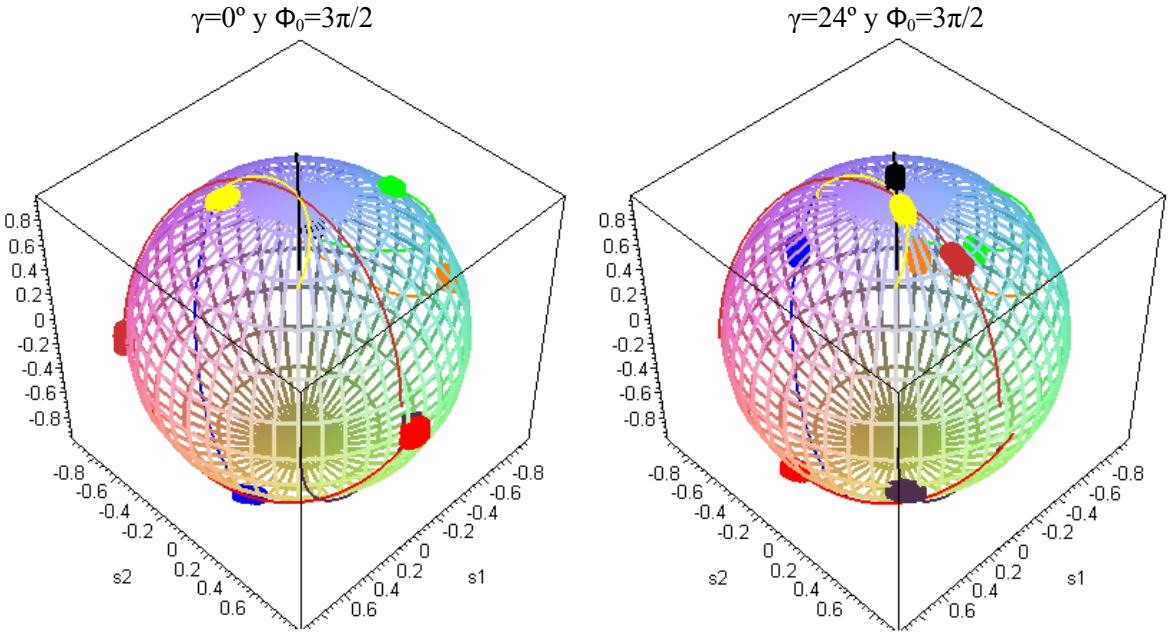


Figura 4-19. Colapso de los SOPs.

Por otra parte es interesante comprobar cómo evolucionan las líneas de SOPs, que dependen de γ, al variar ϕ_0, además de ver cómo varían los SOPs a lo largo de la línea. Estas líneas representan los ocho SOPs de la constelación descrita en el párrafo anterior y su evolución en un intervalo de γ de 0 a 30º. Al variar el valor de ϕ_0 estás líneas se van moviendo sobre la superficie de la esfera de Poincaré.

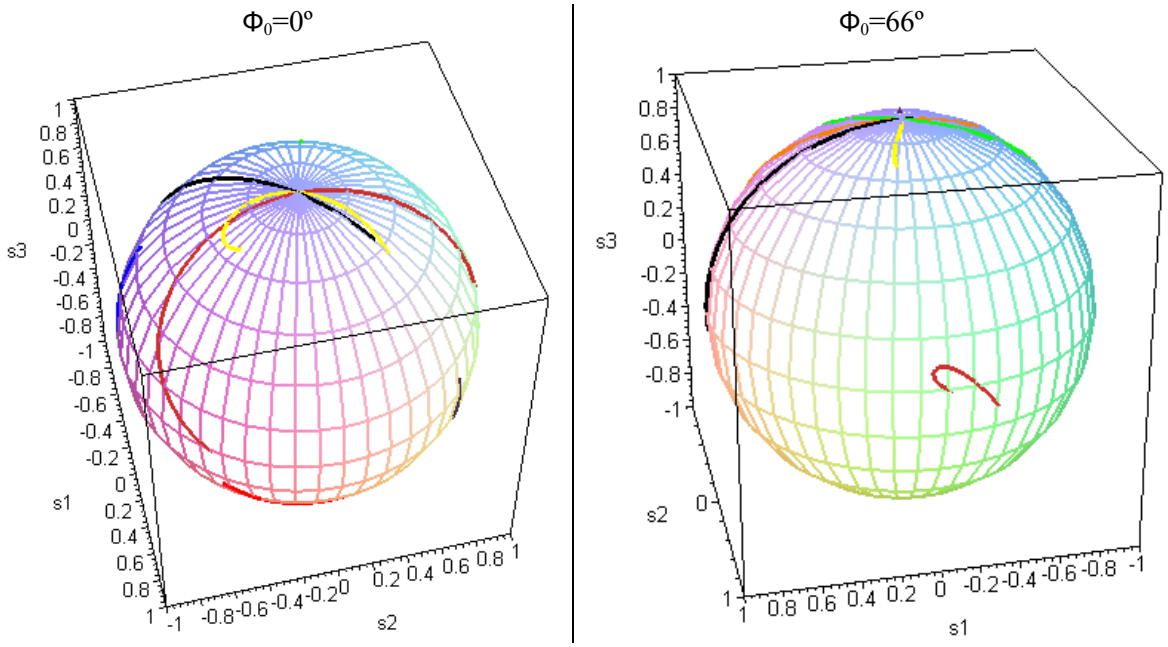


Figura 4-20. Colapso de líneas de SOPs.

En la Figura 4-20 se puede comprobar cómo también se colapsan las líneas de SOPs al moverse el retromodulador. Por ejemplo, la línea naranja que manifiesta un largo recorrido para $\phi_0 = 0$, sin embargo se colapsa en una pequeña línea doblada sobre sí misma en $\phi_0 = 66^\circ$.

4.5. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES SOBRE EL DISEÑO

A la vista de los resultados de las anteriores simulaciones, y a diferencia de lo que se concluyó con el retromodulador en incidencia perpendicular, la configuración más favorable de las células de CL del retromodulador, en términos de mínima variación de superficie de la esfera de Poincaré cubierta, ha resultado ser la que contempla un ángulo de desalineamiento entre las células de $\zeta = 30^\circ$. Por ello, en las simulaciones finales se ha empleado dicho valor.

De las simulaciones utilizadas para la elección del desalineamiento entre células se puede sacar otra conclusión que también se verifica en las simulaciones siguientes a esas. Al variar γ o ϕ_0, sobre la superficie de la esfera de Poincaré se observan zonas muy oscuras y otras muy claras, lo que simboliza que en las zonas oscuras se acumula más superficie que en las zonas claras. La consecuencia de dichas zonas oscuras es que grandes rangos de valores de voltaje darán lugar a SOPs muy próximos, con lo que será difícil distinguirlos. Las zonas claras, sin embargo, se comportan de manera opuesta. A pequeñas variaciones del voltaje aplicado, los SOPs realizarán grandes movimientos sobre la esfera, lo que hará difícil su control preciso.

El comportamiento mencionado se observa muy claramente en las simulaciones en que los SOPs evolucionan sobre líneas de variación de γ. El movimiento de dichos SOPs es muy dispar para unos símbolos u otros al variar γ o ϕ_0. Esto dificulta en gran medida tener bajo control una constelación de un gran número de símbolos. Otro efecto observado es la superposición de SOPs se refleja en que en determinadas combinaciones de γ o ϕ_0 los símbolos se cruzan, con lo que sería muy difícil o imposible distinguirlos en el receptor.

Por último, en la simulación de γ y ϕ_0 variables se puede apreciar la fuerte no linealidad que presenta el comportamiento del retromodulador en movimiento libre. Esta simulación es la más importante por englobar todas las posibles variaciones que tendrá el sistema experimentalmente. Se observa que aunque se parta de una distribución equidistante de SOPs en $\gamma = \phi_0 = 0$, al evolucionar ambos ángulos el comportamiento de los SOPs se revela impredecible. Las líneas de γ variable aumentan y disminuyen con rangos muy amplios con la variación de ϕ_0. Algunas llegan casi a desaparecer, con

lo que el SOP permanecería inalterable con las variaciones ángulares, sin embargo otras se hacen muy largas, añadiendo una gran incertidumbre sobre la situación exacta del SOP. Otra muestra de la no linealidad del comportamiento del retromodulador con las variaciones angulares se aprecia en la velocidad de variación de dichas líneas de SOPs. Observando una animación de la simulación mostrada en la Figura 4-20 sepuede observar, que para un amplio rango dado de variación de ϕ_0, una línea varía muy lentamente permaneciendo casi inalterable y para otro pequeño rango se acelera.

Con todas estas conclusiones surgen dos alternativas de diseño posibles para llevar a cabo la modulación/detección de SOPs si se parte de un retromodulador en movimiento libre:

- Puede realizarse un estudio experimental del comportamiento que tendría cada línea de SOP en función de γ y ϕ_0. Se trataría de un proceso de realimentación, pues la elección de los SOPs se basaría en las líneas que no presentaran superposiciones tras realizar las medidas. Este estudio experimental sería tanto más complejo cuanto mayor fuera la constelación de símbolos a utilizar en la modulación. El desarrollo de un sistema que sistematizara dichas medidas sería altamente recomendable, dado que para cada constelación y retromodulador, debería repetirse todo el conjunto de pruebas. Al conocer el comportamiento del retromodulador para todos los ángulos medidos, el software del receptor sabría dónde esperar cada símbolo según los ángulos instantáneos.
- Otra alternativa podría ser el uso de ráfagas periódicas de voltajes previamente establecidos. Cada cierto tiempo el retromodulador transmitiría la constelación completa de símbolos en serie. De esta manera el receptor sabría a qué símbolo corresponde cada SOP detectado. La periodicidad de esta ráfaga dependería de la rapidez de las variaciones angulares y de la precisión del receptor para discriminar SOPs próximos. La ventaja de esta opción es su gran simplicidad. No requiere de pruebas experimentales previas, a diferencia de la otra alternativa, pudiendo usarse el retromodulador directamente sin calibración. No obstante presenta el inconveniente de su menor eficiencia. Por una parte cada cierto tiempo se transmite información de control, con lo que se pierde cierta tasa binaria y por otra parte, dado que lo constante es el juego de tensiones que están previamente establecidas, podrán existir superposiciones de símbolos con lo que habría que detectar la posibilidad y descartar esos SOPs como válidos para transmitir información.

Una alternativa intermedia sería el uso de ráfagas de control basadas en varias combinaciones de voltajes que generaran símbolos no superpuestos según los ángulos

medidos. De esta manera las pruebas previas serían menores, con lo que la complejidad del proceso no aumentaría demasiado y se obtendría una cierta mejora en la eficiencia.

En este capítulo se ha estudiado e incluido en las simulaciones una serie de factores que estarán presentes en un posible sistema experimental de prueba y que alejan al retromodulador de su comportamiento ideal. Los resultados obtenidos ayudan a comprender cómo se comportará el prototipo desarrollado y también aportan una visión mucho más completa del sistema, revelando una serie de aspectos que aumentan la complejidad del sistema y que habrá que tener en cuenta tanto en el desarrollo del mismo como en las pruebas que se lleven a cabo. Por todo ello, se ha optado por desarrollar un retromodulador cuyo uso, en principio, se restringirá a incidencia perpendicular aunque también podría ser usado en movimiento libre bien usando alguna de las alternativas anteriormente propuestas, que no se implementarán en este proyecto, o bien usando un sistema de modulación OOK como el visto en el apartado 3.3.1, que tampoco se implementará.

De las simulaciones de este capítulo cabe destacar una última conclusión. Se ha demostrado la fuerte dependencia de la superficie cubierta de esfera de Poincaré cuando la variación angular del retromodulador es impredecible, como lo sería en un terminal aéreo en movimiento libre tal como un aerostato. Sin embargo hay un escenario en el que el uso del retromodulador sería idóneo y es a bordo de un satélite geoestacionario. En este caso el movimiento angular del retromodulador sería inexistente dadas las características de este tipo de órbita. Por lo tanto, conocido el ángulo exacto de incidencia se podría diseñar una constelación ad-hoc que maximizaría la eficiencia del sistema, o por el contrario se podría elegir la orientación del retromodulador en el satélite para usar la constelación más eficiente posible. El empleo de la retromodulación se acomoda perfectamente a su uso en satélites geoestacionarios no solo por el hecho de optimizar al máximo la eficiencia de la técnica de modulación, sino por las características propias de la retromodulación, que proporciona un sistema simple, ligero y de bajo consumo.

5. Desarrollo del retromodulador y resultados experimentales

Una vez estudiado a fondo el comportamiento tanto del retromodulador como del sistema completo, es posible afrontar la fase de desarrollo del mismo con el objeto de demostrar la retromodulación en una serie de pruebas experimentales. En este capítulo se detallan las partes más importantes del retromodulador implementado y se explican las consideraciones de diseño que se han realizado durante su desarrollo. Asimismo, se describe el montaje llevado a cabo y los equipos utilizados para realizar las pruebas de laboratorio y por último se muestran los resultados obtenidos en dichas pruebas.

5.1. CÉLULAS DE CRISTAL LÍQUIDO

Las células de cristal líquido constituyen los elementos principales tanto del retromodulador como del sistema completo de comunicación ya que son los encargados de realizar la modulación del haz láser que se transmite desde la estación base. En este apartado se describe en qué consiste el proceso de fabricación de las pantallas que se han utilizado en este proyecto, se discute una serie de consideraciones de diseño que fue necesario tomar durante la fabricación y se muestra el modulador final formado por las dos pantallas de CL ensambladas.

5.1.1. Proceso de fabricación

Una célula de CL está formada por dos placas de vidrio a una distancia constante (algunos μm) selladas entre sí, constituyendo un recipiente en el que se introduce el CL. La pequeña distancia de separación hace que el proceso de fabricación sea muy sensible a impurezas como polvo o residuos ambientales. Por ello la mayoría de etapas del proceso deben realizarse en una cámara limpia. Únicamente después de sellar las placas de vidrio que forman el recipiente podrán extraerse las células de la cámara. Los procesos previos, en los que las caras internas de los vidrios están expuestas al ambiente, se ejecutan dentro de la cámara limpia (Figura 5-1).

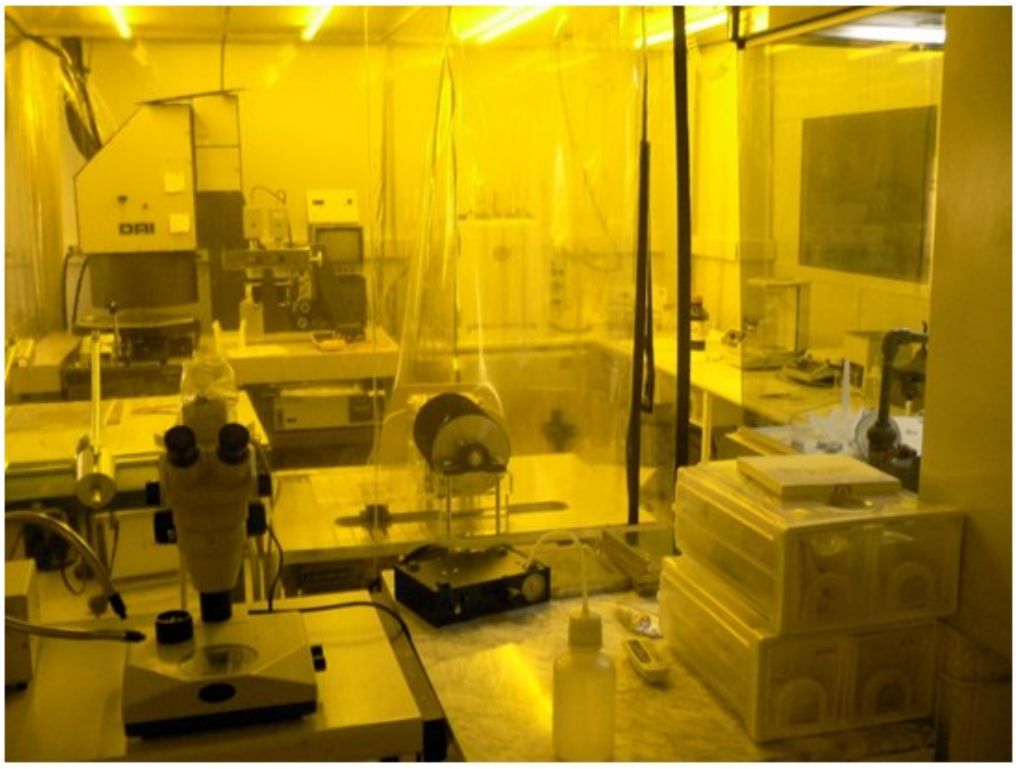


Figura 5-1. Cámara limpia para fabricación de células de CL.

El proceso de fabricación de las células de CL se compone básicamente de las siguientes fases (Figura 5-2):

- Limpieza de vidrios: Inicialmente se preparan las láminas de vidrio sometiéndolas a un tratamiento de lavado.
- Fotolitografía: Se dibujan con ITO (óxido de estaño e indio) las pistas conductoras en los vidrios para formar los píxeles. Esta fase se lleva a cabo mediante un proceso de fotolitografía con una resina fotosensible, un revelado y un posterior ataque químico del ITO no protegido. El objetivo de esta etapa es la obtención de los dibujos de los motivos que se desean incorporar a la pantalla.

Figura 5-2. Proceso de fabricación detallado de las células de CL.

- Acondicionamiento de superficies para alinear el CL: Posteriormente se acondicionan las superficies de las caras internas de los vidrios mediante la deposición de un polímero. Esta etapa es necesaria para garantizar que el CL quede orientado de la forma deseada en el interior de la célula.
- Deposición de espaciadores sobre una de las placas: Una vez acondicionadas las superficies se depositan espaciadores, que son pequeñas esferas de diámetro calibrado (~1,5µm) cuyo objetivo es garantizar que la distancia entre los dos vidrios quede uniforme.

- Montaje de la célula y curado del adhesivo: Se deposita un cerco adhesivo (*gasket*) sobre uno de los vidrios. A continuación se montan los dos vidrios teniendo en cuenta que en el cerco debe quedar una abertura por la cual se llenará la célula de CL.
- Llenado: El llenado de la célula se realiza en una campana de vacío y después se sella la abertura.
- Conexiones eléctricas: El cableado de la célula es la última etapa de la fabricación y se realiza fuera de la cámara limpia. Las uniones de ITO con los cables de cobre se realizan empleando Indio en lugar de Estaño.

5.1.2. Consideraciones de diseño

La primera decisión que es necesario tomar a la hora de fabricar una célula de CL es el área de la zona activa. Como se verá en el apartado 5.4.1, el retrorreflector empleado tiene un diámetro de 7,5cm, por lo que las células también se fabricarán para que el diámetro del área activa sea de 7,5cm. La fabricación de células de un solo píxel tan grandes acarrea una serie de dificultades debido su gran tamaño:

- Por una parte, se producen cortocircuitos entre los dos vidrios al tener áreas tan grandes, lo que obliga a depositar con el *spinner* una capa aislante de SiO_2 para evitar todo contacto eléctrico entre ambos vidrios.
- Como ya se ha explicado, es fundamental que las células se fabriquen en un ambiente limpio. Sin embargo, trabajar con células con una superficie tan grande hace que la probabilidad de que una mota de polvo se deposite sobre las superficies sea mucho mayor.
- Otro problema que surge es que depositar líquidos mediante el *spinner* sobre vidrios de gran tamaño tiene la consecuencia de que la capa depositada no es uniforme. El espesor de la capa del líquido será mayor en los bordes que en el centro debido a que la velocidad lineal del vidrio aumenta hacia los bordes. Además se da la circunstancia de que los vidrios no caben en el *spinner*, lo que se soluciona cortando las esquinas, como puede verse en las imágenes. El problema de la deposición de líquidos con *spinner* se produce en el acondicionamiento de superficies con Nylon y en la deposición de SiO_2.
- El espesor final de las células es difícil de controlar con vidrios tan grandes aún teniendo una gran cantidad de espaciadores repartidos uniformemente sobre las superficies de los vidrios.
- Al montar las células es necesario aplicar una presión muy constante y homogénea sobre los vidrios. Con una superficie tan grande el proceso se

hace complicado y siempre quedan zonas de distinto espesor (el centro tiende a abombarse).

Una alternativa a usar células tan grandes sería distribuir varias de menor tamaño en un array bidimensional. Sin embargo esto no es recomendable debido principalmente a dos causas:

- La fabricación de células de CL en una línea de producción no industrial como la que se ha descrito hace que ninguna célula tenga exactamente las mismas características que otra, por lo que un array de estas células sería demasiado heterogéneo como para ser usado en un retromodulador, en que el haz del láser puede incidir en una zona distinta cada vez.
- Cada celula necesita de una determinada área alrededor de la zona activa para cablear los electrodos, con lo que un array de células tendría demasiados espacios desaprovechados entre células.

Dado que la superficie transversal de entrada al retrorreflector tiene forma circular, se fabricarán células monopíxel con el área activa circular, lo que se consigue haciendo que la máscara que se utiliza para dibujar los píxeles en el ITO tenga la forma de un círculo sobre el vidrio durante la etapa de fotolitografía.

Una vez establecido el tamaño de las pantallas de CL, lo recomendable sería que el *spot* del láser incidente en el retromodulador tuviera un diámetro igual o menor que el de la zona activa. En el momento en el que el diámetro del *spot* fuera mayor, se estaría desperdiciando potencia óptica. Se puede evitar este desaprovechamiento sin más que usar un telescopio de diámetro mayor que D.

$$\Theta = 1,22\left(\frac{\lambda}{D}\right) \Rightarrow D = 1,22\left(\frac{\lambda}{\vartheta}\right) = \frac{1,22\lambda}{tg\left(\frac{D_{spot}}{d}\right)} \qquad \textbf{(5-1)}$$

El ángulo Θ de la ecuación (5-1) representa el límite de difracción de un telesopio [28], que determina el mínimo ángulo de difracción y por lo tanto la mínima divergencia del láser al aumentar la distancia. Establecida la longitud de onda, el ángulo Θ lo determina la distancia a cubrir d y el diámetro del spot deseado (Figura 5-3).

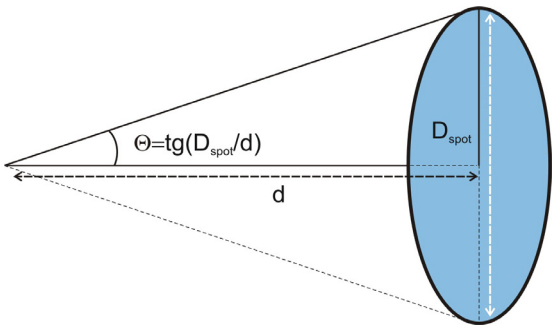


Figura 5-3. Difracción Θ del telescopio.

5.1.3. Ensamblaje de las dos células

Una vez obtenidas las células de CL siguiendo el proceso de fabricación descrito, es necesario ensamblar entre sí las dos células que constituirán el modulador. Para ello se aplica *index matching* entre las caras de sendas pantallas y posteriormente se adhieren. El *index matching* es un gel óptico cuyo objetivo es minimizar las diferencias de índices de refracción en las discontinuidades que suponen el paso de una célula a la siguiente y su aplicación es necesaria para evitar reflexiones y pérdidas de potencia.

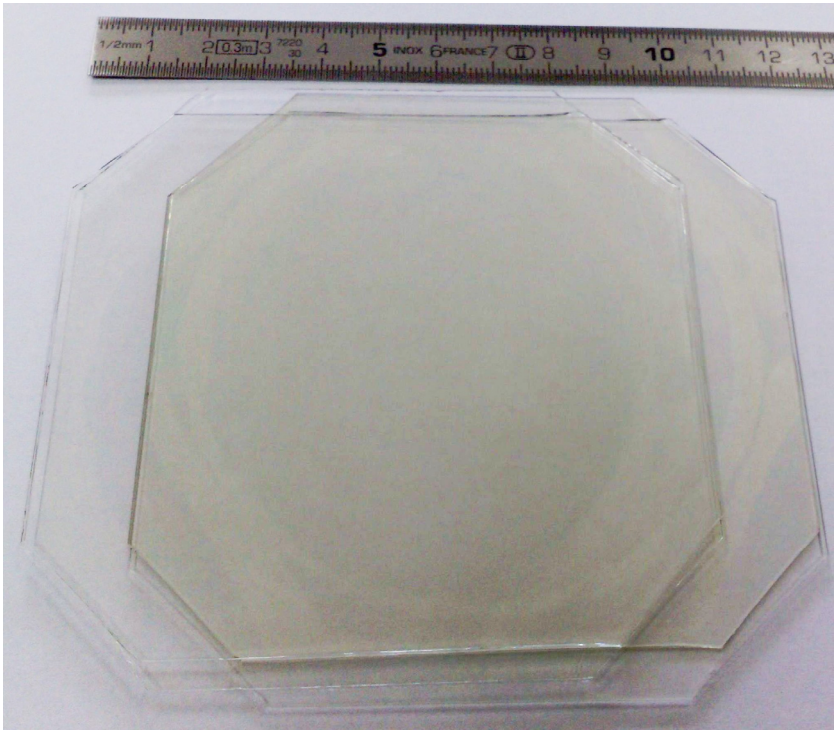


Figura 5-4. Montaje de las dos células de CL con Φ=0.

En los capítulos 3 y 4 se estudió cual era el ángulo ζ de desalineamiento entre células que hacía más eficiente la modulación llevada a cabo por el retromodulador. Por una parte se concluyó que un ángulo de $\phi = 0$ era conveniente en el caso del retromodulador en incidencia perpendicular y por otra parte el ángulo óptimo obtenido de las simulaciones del retromodulador en movimiento libre fue de $\phi = 30º$. Dado que las pruebas que se van a realizar van a ser en laboratorio con incidencia perpendicular, el ángulo elegido ha sido el primero y por ello las células se han ensamblado con la misma orientación (Figura 5-4).

5.2. CONTROL DE TEMPERATURA DE LAS PANTALLAS DE CL

La temperatura tiene una influencia crítica sobre el comportamiento dinámico de las moléculas del CL y sobre su fase. En todo momento debe ajustarse a un rango determinado, por debajo del cual se produce la cristalización del CL y si se sobrepasa

tiene lugar un cambio de fase perdiendo en ambos casos su comportamiento en cuanto a elemento modificador del SOP. El CL W212 utilizado en el retromodulador tiene un rango que va desde ~0ºC hasta 98ºC. Cuanto más próxima sea la temperatura a la de cristalización, más lentamente responderán las moléculas del CL. Por ello es necesario un control de temperatura que la mantenga alrededor de un valor óptimo, que se ha elegido de 50ºC ±5ºC, para que su comportamiento no varíe con posibles variaciones de temperatura. Este mecanismo de control estará formado por un circuito medidor de la temperatura y por otro calentador de las pantallas.

5.2.1. Circuito de medición de la temperatura

De la importancia de mantener las células de CL a una temperatura determinada surge la necesidad de realizar mediciones de forma continuada. Para ello se ha utilizado un termorresistor RTD de tipo PT100 que proporciona mediciones suficientemente precisas y estables en el tiempo dentro del rango necesario. El termorresistor se ha utilizado en una configuración de puente de Wheatstone (Figura 5-5) que ofrece una salida de tensión proporcional a las variaciones de la resistencia del RTD.

El termorresistor PT100 (Figura 5-6) debe su nombre a que está fabricado en platino (Pt) y presenta una resistencia de 100Ω a 0ºC. Es un dispositivo altamente lineal en un rango muy amplio de temperatura, que incluye ampliamente el rango de interés de la aplicación. Dentro de este rango la variación de la resistencia con la temperatura puede expresarse como:

$$R_{RTD} = R_0\left(1+\alpha\left(T-T_0\right)\right) \qquad \textbf{(5-2)}$$

donde α es el coeficiente de temperatura de la resistencia cuyo valor entre 0ºC y 100ºC es de $\alpha = 0,00385\,\Omega/^{o}C$ y R_0 es una resistencia de referencia a una temperatura de referencia T_0, por ejemplo, si $T_0 = 0K$, entonces $R_0 = 100\,\Omega$ y la ecuación (5-2) queda simplificada como:

$$R_{RTD} = 100 + 0,385T \qquad \textbf{(5-3)}$$

Como se puede observar, la ecuación (5-3) muestra un comportamiento ideal lineal. Tras realizar varias medidas experimentales aplicando temperaturas conocidas al PT100 y midiendo su resistencia de salida se pudo comprobar que el comportamiento real es casi idéntico al ideal con un coeficiente de correlación de 0,997.

$$V_o = \left(\frac{R_{RTD}}{R_{RTD}+R_3} - \frac{R_2}{R_1+R_2}\right)V_s \qquad \textbf{(5-4)}$$

Dado que la tensión de salida de un puente de Wheatstone viene dada por la ecuación (5-4), para los valores $R_1 = R_3 = 1000\,\Omega$, $R_2 = 100\,\Omega$ y $V_s = 12V$, se obtiene

una variación de tensión de salida V_o entre 169mV y 206mV correspondiente una variación de la temperatura entre 45ºC y 55ºC, margen suficiente para un funcionamiento correcto de las células de CL.

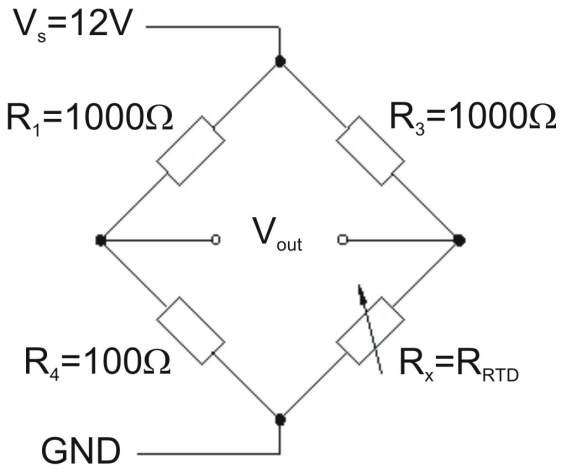


Figura 5-5. Circuito de medición de la temperatura.

El margen de tensiones calculado es suficiente como para que el dispositivo de adquisición pueda detectarlo sin necesidad de una etapa previa de amplificación. Por último, el software de control se limita a comparar la tensión adquirida con el margen calculado y actuar en consecuencia aumentando o disminuyendo la temperatura mediante la acción o inhibición del sistema calentador descrito a continuación.

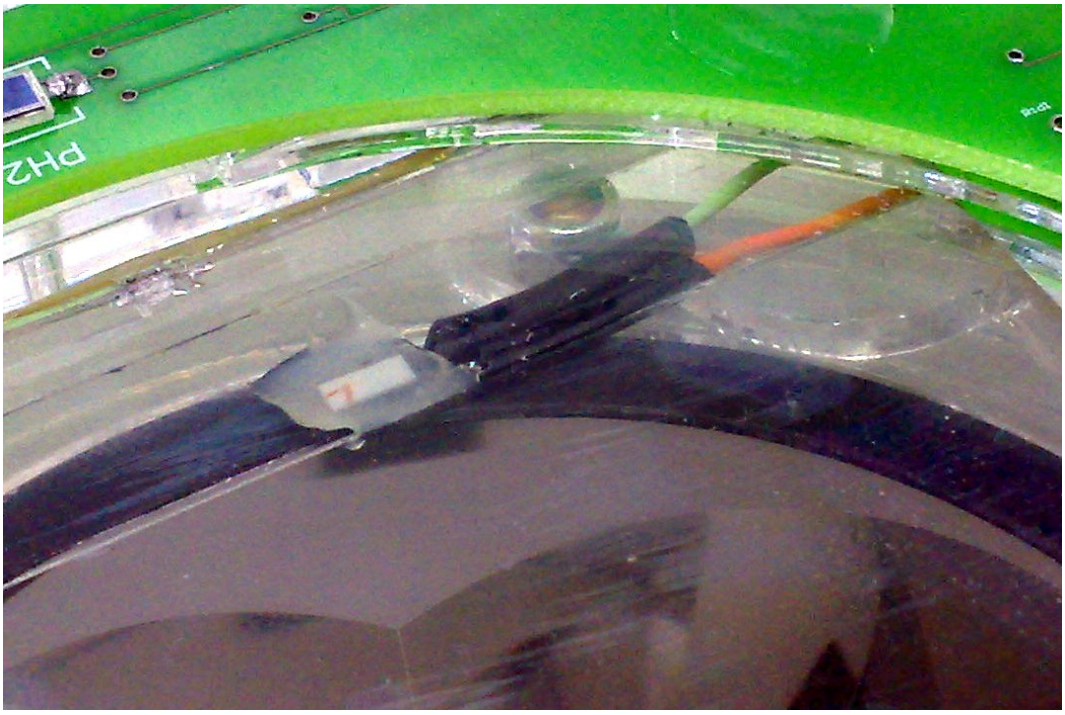


Figura 5-6. Detalle del PT100 adherido con resina epoxi al retromodulador.

5.2.2. Sistema calentador de las células de CL

Como se ha dicho, las células de CL deben estar en todo momento a una temperatura que no supere los ±5ºC alrededor de los 50ºC del estado ideal. Dado que esta temperatura se encuentra muy por encima de la temperatura ambiente el sistema calentador de las pantallas debe estar funcionando de forma ininterrumpida.

El sistema calentador diseñado está compuesto por dos placas de vidrio similares a las empleadas en el proceso de fabricación de las células de CL. Una de las superficies de estas placas tiene una capa de ITO con una conductividad de 1 Ω por cuadro. Soldando dos líneas de indio a lo largo de dos de los extremos de la superficie de ITO se obtiene una resistencia entre ambos extremos, que perderá energía en forma de calor cuando se le aplique una tensión. Este es el mecanismo en que se basan los calentadores empleados para aplicar temperatura a las células de CL.

Se han empleado dos calentadores en total, una lámina de vidrio para cada una de las caras del modulador, para asegurar una temperatura adecuada en ambas células de CL. Debido a que el vidrio no es un conductor perfecto del calor, es preferible ensamblar los calentadores en contacto directo con las células de CL por la cara sobre la que se encuentra el ITO. Esta disposición produce un problema estructural debido al hecho de que las pistas de indio tienen una cierta altura y dificultan el contacto directo entre la célula de CL y el calentador.

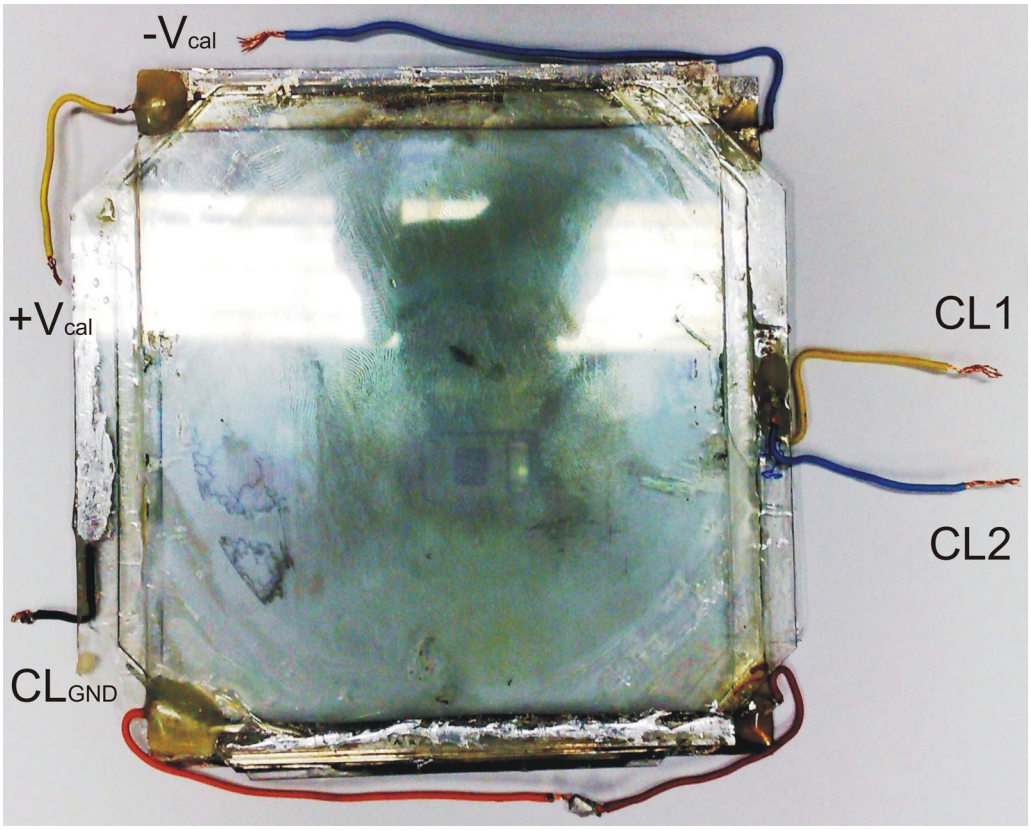


Figura 5-7. Primer prototipo del modulador con calentadores hacia el exterior.

Por ello inicialmente se dispusieron los calentadores con la capa de ITO hacia el exterior (Figura 5-7), sin embargo en el retromodulador final se sustituyó el soldaje a mano del indio sobre la placa de ITO por una deposición de aluminio por evaporación térmica angular (PVD). Con este procedimiento se obtuvo una superficie longitudinal conductora homogénea y muy plana que facilitó en gran medida el cableado del dispositivo proporcionando un calentamiento mucho más homogéneo directamente sobre las células de CL.

Para el ensamblado definitivo de las placas de ITO calentadoras al conjunto de las dos células de CL también se empleó *index matching* con el objetivo de minimizar los saltos de índice de refracción entre unos vidrios y otros. Esta homogeneidad en el índice de refracción es fundamental ya que el retromodulador final está compuesto por seis vidrios en paralelo y, teniendo en cuenta que, tras atravesar por primera vez las seis capas, la luz se refleja en el retrorreflector para atravesarlas de nuevo a la vuelta, resulta un total de 12 transiciones entre capas de vidrio, que podrían ocasionar graves pérdidas de potencia óptica.

En la Figura 5-8 se muestra el aspecto del modulador final con los calentadores instalados.

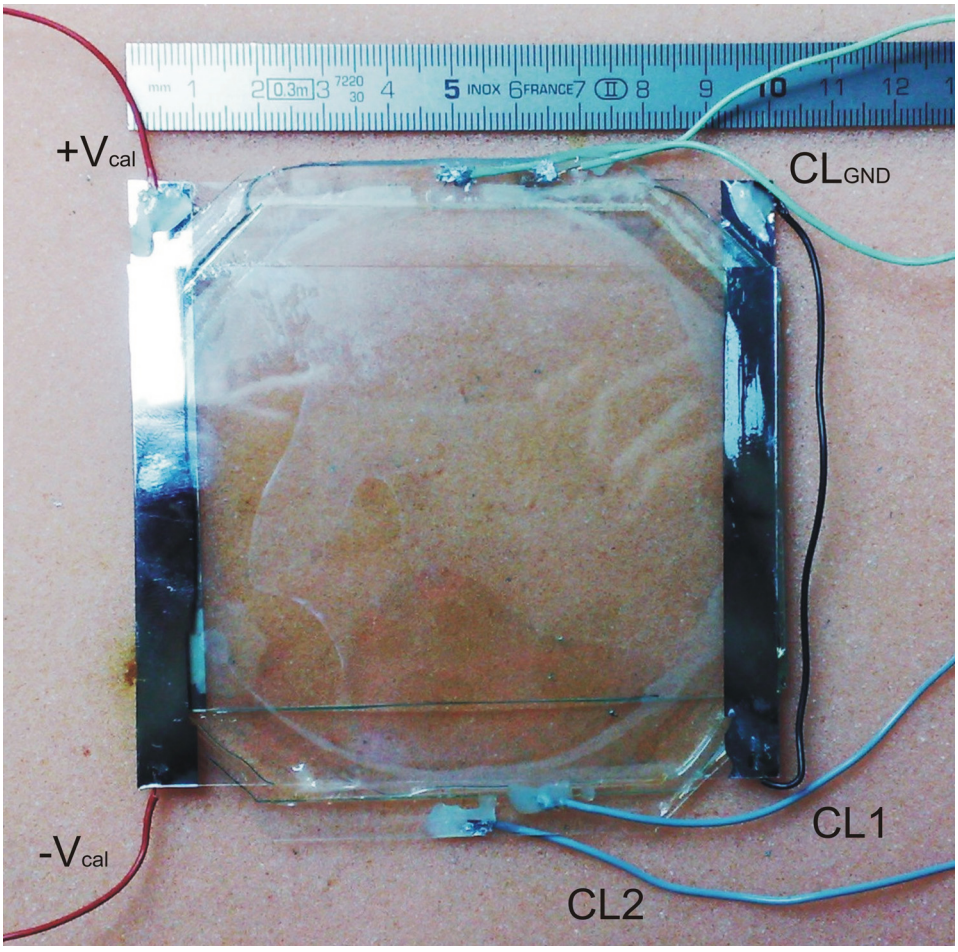


Figura 5-8. Modulador final con calentadores instalados hacia las células de CL.

5.3. PLACAS DE CIRCUITO IMPRESO

El retromodulador final incluirá dos grupos de circuitos electrónicos independientes que se situarán sobre una misma placa de circuito impreso. Por una parte es necesario el montaje de un puente de Wheatstone como el que se ha explicado en el apartado anterior y por otra parte se montará un esquema de fotodetección/amplificación, que se describe a continuación.

5.3.1. Fotodetectores y amplificadores

Una técnica empleada para mantener el apuntamiento del láser de la estación base sobre un objeto móvil, que en este caso sería el retromodulador, es situar sobre éste último cuatro fotodetectores en los extremos de una cruz simétrica y comparar continuamente las intensidades de cada uno de los cuatro detectores para deducir hacia dónde se está moviendo el terminal. Para ello se implementó un diseño realizado en un proyecto paralelo (Figura 5-9).

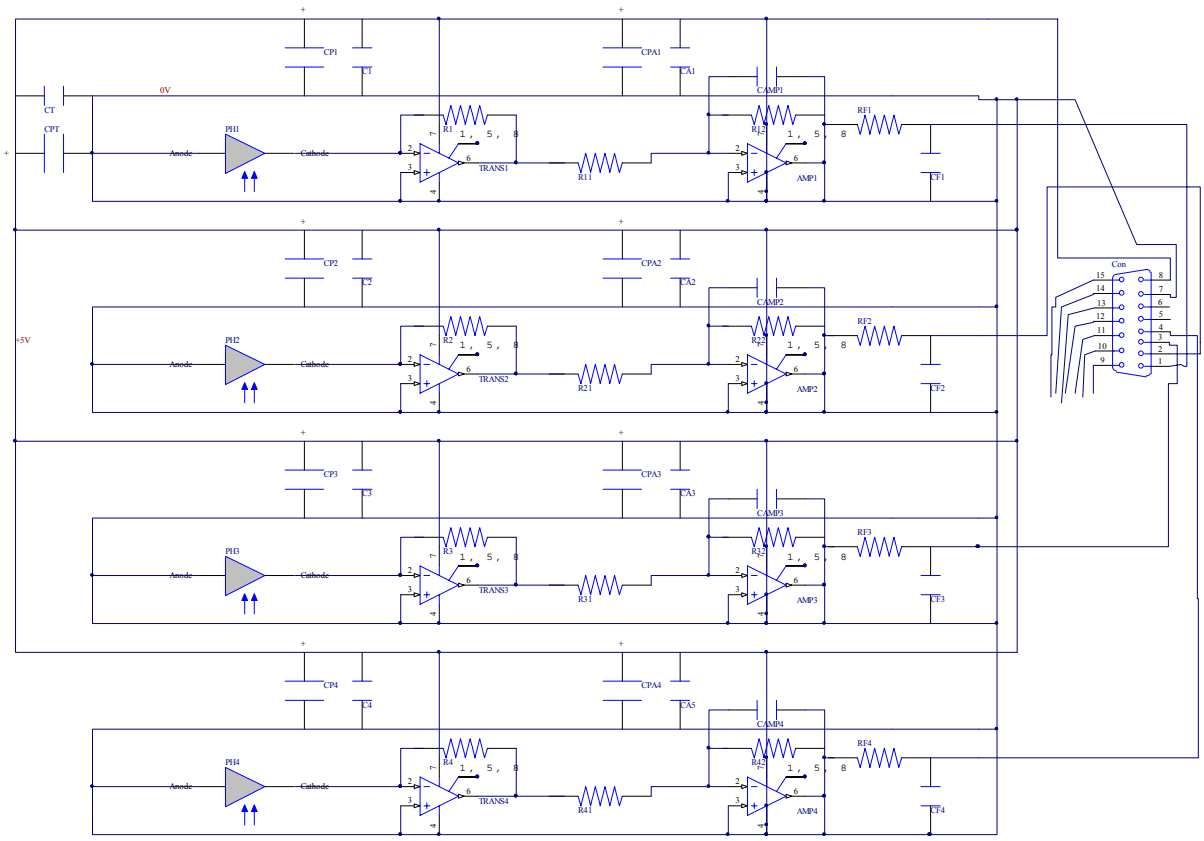


Figura 5-9. Esquemáticos de los circuitos de detección/amplificación.

El circuito se basa en la detección de las señales y su posterior amplificación y filtrado para acondicionarlas antes de la adquisición. El haz láser se recibe por cuatro fotodiodos planos tipo PIN modelo BPW34S de *Osram* que ofrecen un área activa de 7mm^2 y transforman la señal lumínica en variaciones de corriente. A continuación cada

señal se preamplifica mediante una etapa de transimpedancia basada en el circuito integrado OPA380 de *Texas Instruments* que proporciona una ganancia de 100dB utilizando una resistencia de realimentación de 100kΩ. Esta resistencia proporciona un ancho de banda suficiente para las señales de baja frecuencia que se precisan, optimizando así la ganancia. Como las señales de salida son del orden de algunos mV, para la adquisición y posterior procesamiento de las señales se utiliza un amplificador diferencial AD8038 de *Analog Devices*, con el que se consiguen tensiones del orden de cientos de mV, adecuadas para ser adquiridas y tratadas. Por último, a la salida del circuito se coloca un filtro paso bajo para eliminar posibles ruidos de mayor frecuencia que la de información. Para eliminar acoplos de continua se utilizan cerca de los circuitos integrados parejas de un condensador cerámico 100nF y otro electrolítico de 100uF en paralelo.

5.3.2. Diagramas de las placas

Una vez obtenidos los diagramas completos de los circuitos electrónicos se procedió al diseño de la placa de circuito integrado para lo que se empleo la herramienta *Protel* DXP de *Altium*. En la Figura 5-10 se pueden ver la capa superior e inferior de dicho diseño. En la superior se sitúan las conexiones para los fotodiodos y en la inferior el resto de conexionado que soporta los cuatro circuitos aplificadores y el puente de wheatstone. En la Figura 5-11 se muestra el aspecto de la PCB fabricada por pedido a la empresa Elate, S.A.

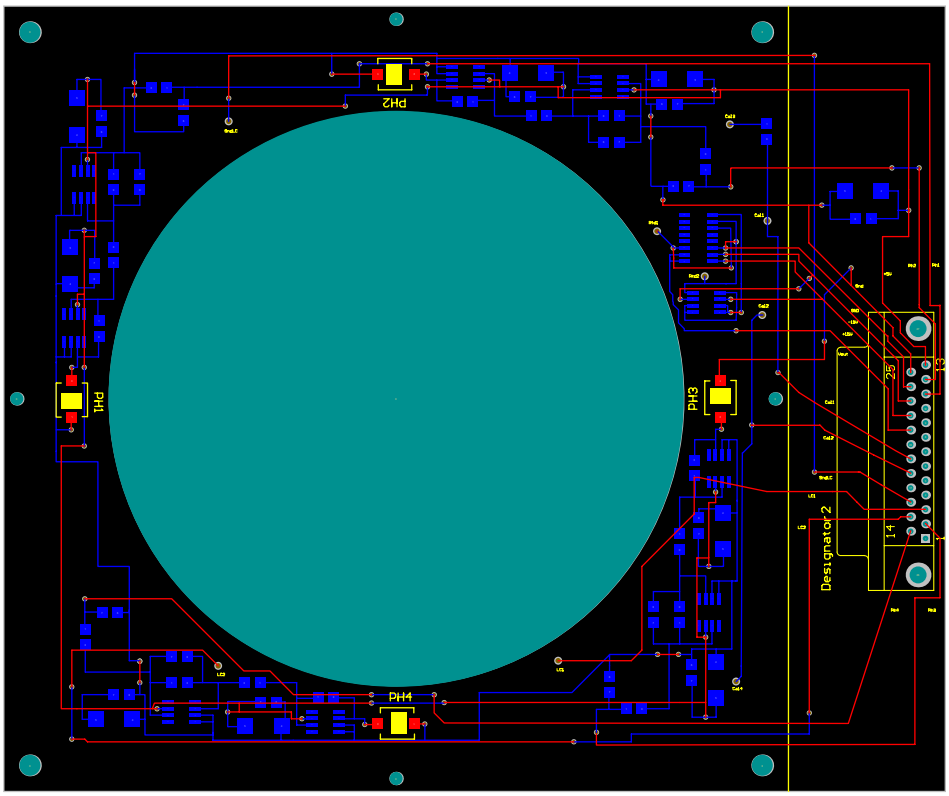


Figura 5-10. Diagrama de la placa de circuito impreso.

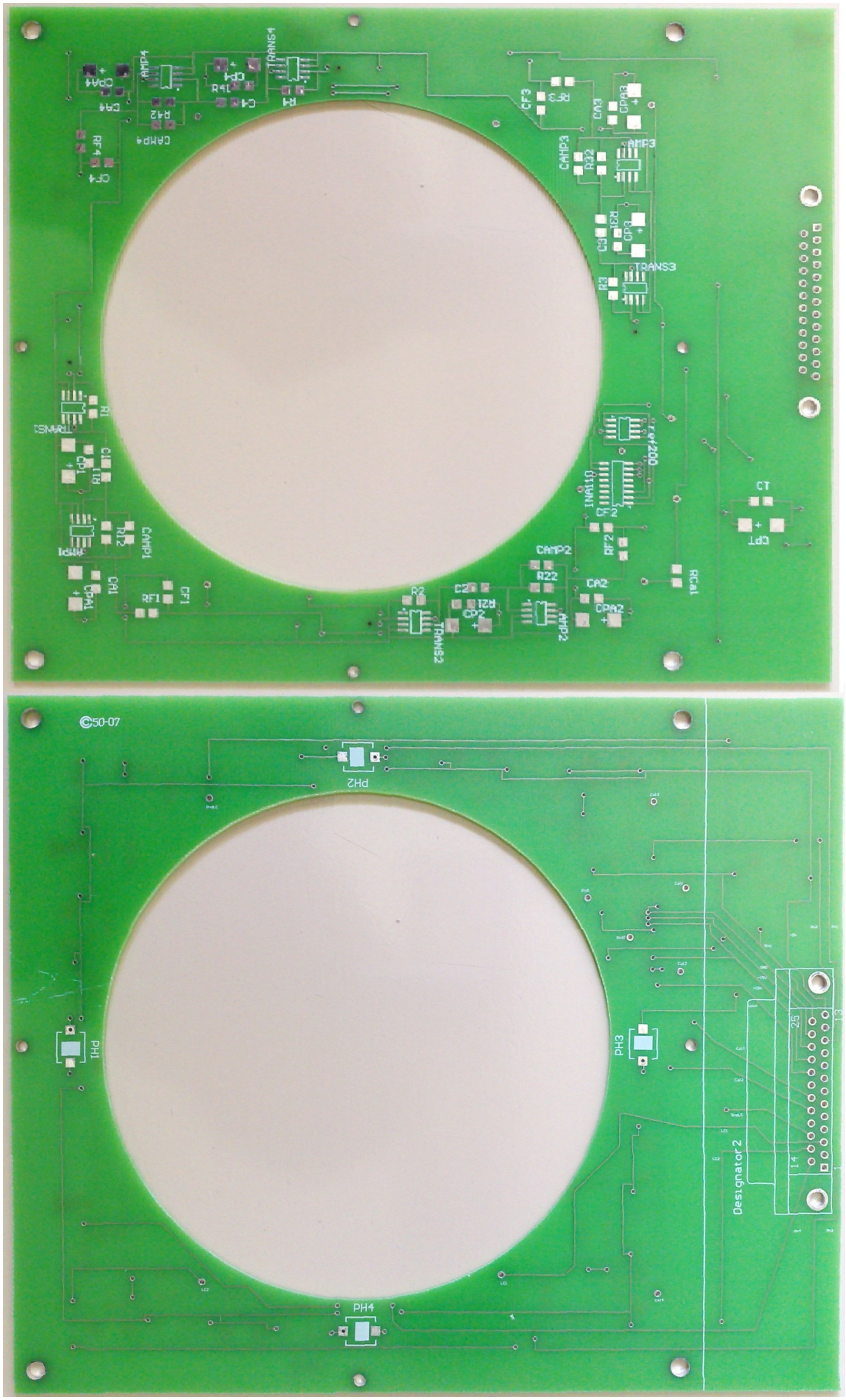


Figura 5-11. Placa de circuito impreso fabricada.

5.4. MONTAJE E INTEGRACIÓN DEL SISTEMA

En este apartado se describen los restantes componentes del sistema retromodulador: el retrorreflector, el soporte que proporciona integridad estructural al dispositivo y el equipo de control y adquisición que intercambiará con el retromodulador datos de distinta naturaleza, tales como las mediciones de temperatura o las señales moduladoras de ataque a las células de CL.

5.4.1. Retrorreflector

El retrorreflector usado en el retromodulador es el modelo 02 CCG 008 de *Melles Griot*, que se corresponde con el de mayor tamaño ofrecido por la marca. Su diámetro es de 75 mm y su profundidad de 52,5 mm.

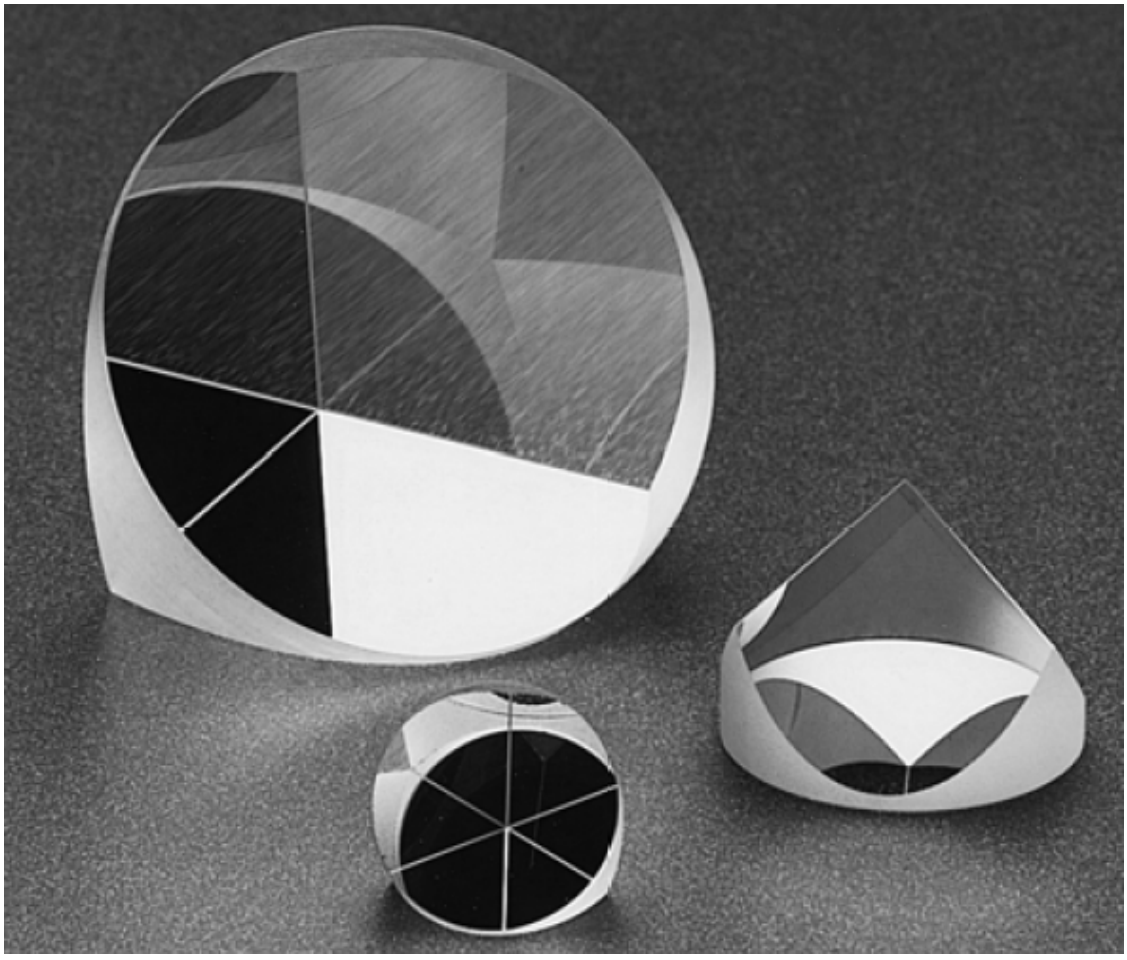


Figura 5-12. Retrorreflector de esquina de cubo de la marca Melles Griot.

El retrorreflector (Figura 5-12) se proporciona como una pieza sólida y se ha montado dentro de un soporte cilíndrico de metal que le proporciona protección y que

facilita su integración con el conjunto del retromodulador a través del soporte descrito en el siguiente apartado.

5.4.2. Soporte estructural del retromodulador

Con el retrorreflector montado sobre su soporte y la placa de circuito impreso y el modulador fabricados, es necesario desarrollar un soporte estructural que dote de robustez al conjunto del retromodulador de forma que se obtenga un sistema integrado. Dicho soporte se ha fabricado a base de láminas de metacrilato de distintos espesores atornilladas entre sí. Las placas utilizadas tienen unos grosores de 2 y 5 mm y han sido cortadas mediante un láser de CO_2 *Helix 24* de *Epilog* (Figura 5-13).

Figura 5-13. Láser de CO_2 Helix 24 de Epilog.

El retromodulador va sujeto entre siete láminas de 5 mm y el conjunto va atornillado a otras tres láminas entre las cuales se aloja la placa de circuito impreso y el retromodulador.

El láser *Epilog* se comporta como una impresora a la que únicamente es necesario pasarle los perfiles que describen las placas que se desean obtener. Los esquemas de las láminas de metacrilato utilizadas para el ensamblaje del retrorreflector, el modulador y la PCB se pueden ver en la Figura 5-14.

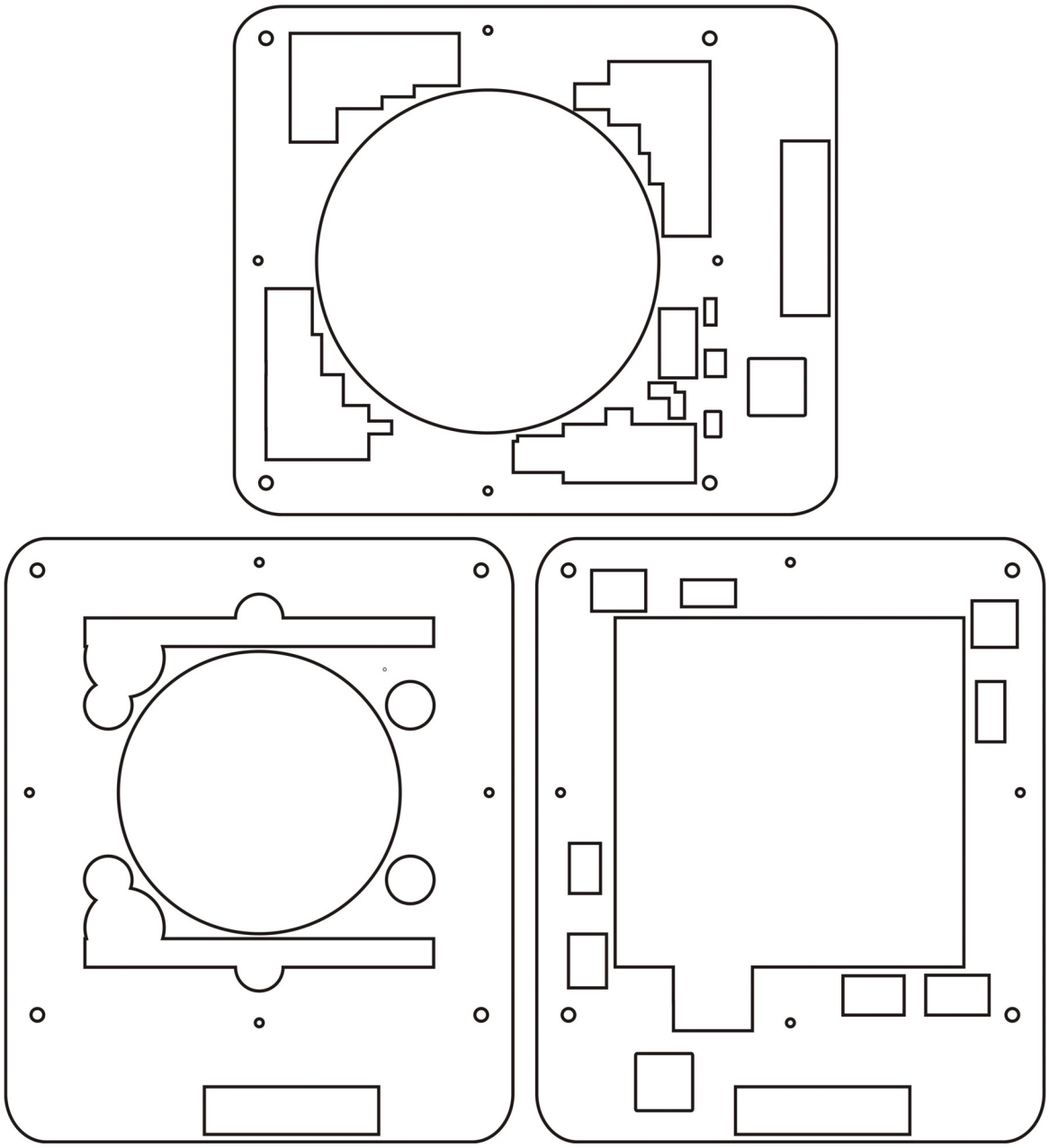


Figura 5-14. Esquemas de las placas de metacrilato usadas como soporte estructural del retromodulador.

5.4.3. Equipo de control y adquisición

Como se vio en el apartado 5.3, el retromodulador tiene un interfaz de entrada/salida tipo puerto paralelo, a través del cual se produce el intercambio de señales con el equipo de control y adquisición. Dado que el objetivo del retromodulador es su inclusión a bordo de un sistema móvil debe comportarse como un dispositivo autónomo, por lo cual se optó por la utilización del sistema de control y adquisición *CompactRIO* (Figura 5-15) de *National Instruments*, que ofrece una arquitectura embebida basada en tecnología de FPGA reconfigurable que acepta diferentes módulos de entrada salida. Además el *CompactRIO* puede ejecutar programas desarrollados en el entorno LabVIEW de *National Instruments*, por lo que su programación es muy simple y visual.

Figura 5-15. Sistema de control y adquisición CompactRIO de National Instruments.

Para llevar a cabo las pruebas de laboratorio el *CompactRIO* se completó con un módulo NI 9201 de ocho canales de entrada analógicos y con otro NI 9474 de ocho canales de salida digitales, similar al que se puede ver en la Figura 5-15. El *CompactRIO* es un dispositivo de bajo consumo (entre 7 y 10W), por lo que puede funcionar conectado a una batería. En un dispositivo móvil real el funcionamiento óptimo sería con batería, sin embargo para las pruebas de laboratorio se empleó la fuente de alimentación FP-PS-4 (Figura 5-16) de *National Instruments* que proporciona una tensión continua de salida de 24V.

Figura 5-16. Fuente de alimentación FP-PS-4 de National Instruments.

5.4.4. Comunicación retromodulador-CompactRIO

Como se ha dicho, la comunicación entre el retromodulador y el *compactRIO* se realiza mediante un cable paralelo, del que solo se usan 12 de los hilos. En la Tabla 5-1 puede verse cuales son estas señales así como su propósito y el sentido en el que viaja la información que transportan.

Señal	Función	Sentido	Color cable
Gnd	Tierra del circuito fotodetectores/amplificadores	E	Negro
+5V	Alimentación posit. circuito fotodetectores/amplificadores	E	Rojo
–5V	Alimentación negat. circuito fotodetectores/amplificadores	E	Rojo-negro
Ph1	Señal recibida en el fotodiodo 1 tras amplificicación	S	Verde
Ph2	Señal recibida en el fotodiodo 2 tras amplificicación	S	Azul
Ph3	Señal recibida en el fotodiodo 3 tras amplificicación	S	Naranja
Ph4	Señal recibida en el fotodiodo 4 tras amplificicación	S	Amarillo
CL1	Señal de ataque a la célula 1 de CL	E	Blanco-azul
CL2	Señal de ataque a la célula 2 de CL	E	Blanco -rojo
GndCL	Tierra común de las células de CL	E	Amarillo-rojo
Vcal	Señal de ataque a los calefactores	E	Blanco
GndCal	Tierra de los calefactores	E	Marrón
+12V	Alimentación positiva del circuito de control de Tª	E	Rosa
–12V	Alimentación negativa del circuito de control de Tª	E	Gris
+VTout	Señal positiva de la tensión en el PT100	S	Celeste
–VTout	Señal negativa de la tensión en el PT100	S	Morado

Tabla 5-1. Señales de E/S (E: Entrada al retromodulador, S: Salida del retromodulador) intercambiadas entre el retromodulador y el compactRIO.

Se pueden dividir las señales de entrada al retromodulador como señales de alimentación y señales de control. Las primeras son las correspondientes a la alimentación de los circuitos electrónicos de la PCB y son tensiones continuas que se generan mediante conversores DC-DC a partir del voltaje de salida de 24V DC que proporciona la fuente de alimentación del *CompactRIO*. Los conversores DC-DC utilizados han sido el REC3-XX05DR que proporciona una tensión de salida de ±5V al circuito de fotodetección y amplificación y el REC3-XX12DR que proporciona ±12V al circuito de control de temperatura, ambos de la marca *RECOM*.

Por otra parte, las señales de control son las de ataque a las células de CL y a sus calefactores. Ambas están controladas por sendos programas desarrollados en el entorno LabVIEW. El último ya fue descrito en el apartado 5.2.1 y sus señales se generan mediante el módulo de salidas digitales del *CompactRIO*. El primero se basa en el

protocolo serie RS232, mediante el cual es posible convertir cualquier dato en ráfagas de bits con bit de inicio y de parada, que el extremo receptor puede recuperar. Para la generación de estos pulsos binarios se emplea la salida serie disponible en el *CompactRIO* que ataca directamente a las células de CL del retromodulador. En las pruebas han sido utilizadas estas señales binarias por la carencia de un módulo de salidas analógicas que generara señales de diferentes amplitudes para conseguir distintos SOPs, por lo que el número de SOPs que ha sido posible generar es dos.

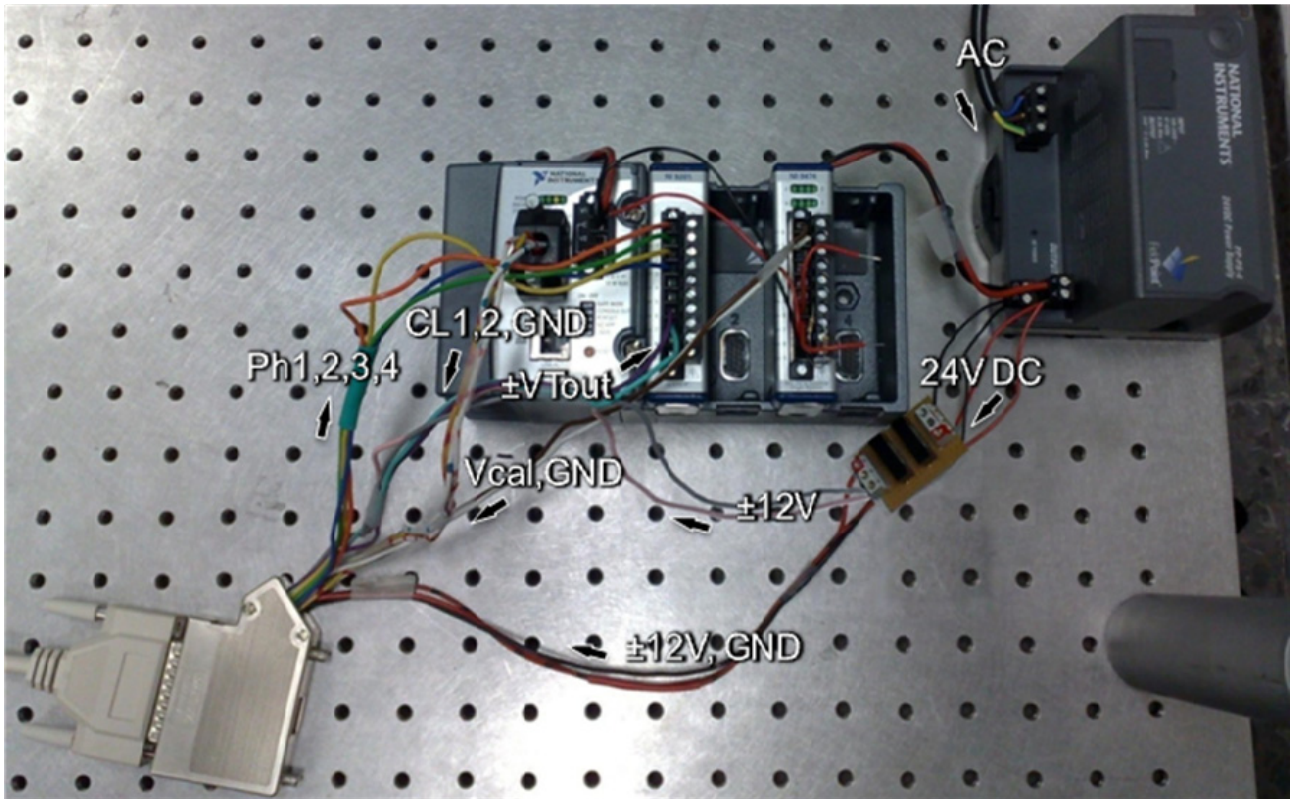


Figura 5-17. Conexionado retromodulador-CompactRIO.

Por último las señales de salida del retromodulador son las correspondientes a los cuatro fotodiodos y a la salida diferencial del puente de Wheatstone del circuito de medición de temperatura. Esta última señal también es señal de entrada del programa LabVIEW de control de temperatura. Las seis señales se capturan mediante el módulo de entradas analógicas del *CompactRIO*.

En la Figura 5-17 se muestra la conexión de los doce cables que forman el interfaz retromodulador-*CompactRIO*. Se puede leer el nombre de cada cable según la nomenclatura utilizada en la Tabla 5-1 y siguiendo el mismo esquema de colores. También se indica con una flecha la dirección de cada señal, hacia la izquierda si va hacia el retromodulador (E) o hacia la derecha si viene de él (S).

5.4.5. Sistema completo

Tras el ensamblado de todos los elementos descritos anteriormente, en la Figura 5-18 se muestra el aspecto del retromodulador final como sistema integrado montado sobre una regleta de precisión para mesa óptica preparado para llevar a cabo las pruebas de laboratorio.

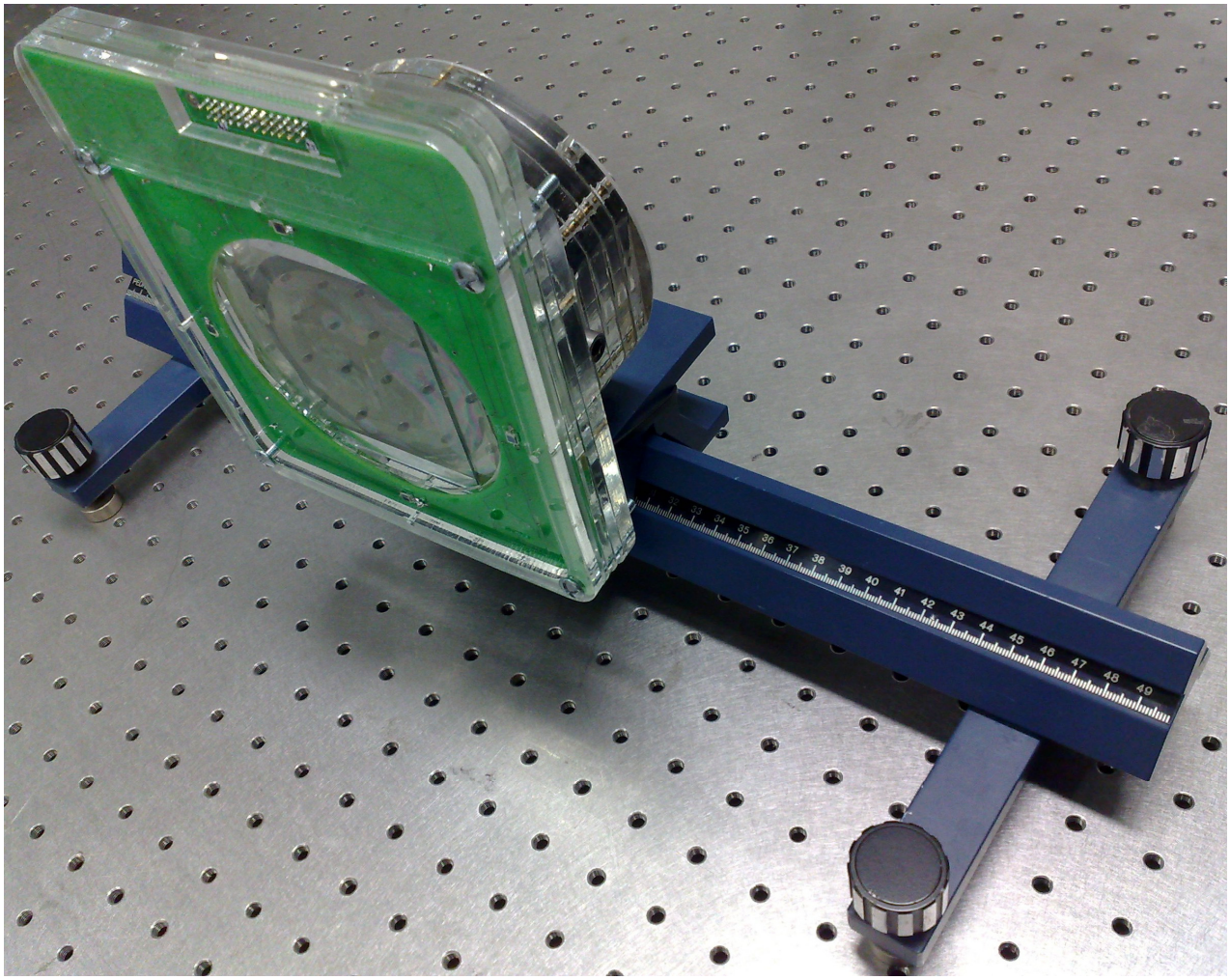


Figura 5-18. Retromodulador utilizado en las pruebas de laboratorio.

En la Figura 5-19 se muestra el retromodulador en una vista frontal y posterior. En la vista frontal pueden apreciarse los cuatro fotodiodos alrededor del retrorreflector. También puede verse en la parte superior del retrorreflector el PT100 adherido a las pantallas con resina epoxi. En la vista posterior se observa el conector hembra para cable paralelo que comunica el retromodulador con el *CompactRIO*.

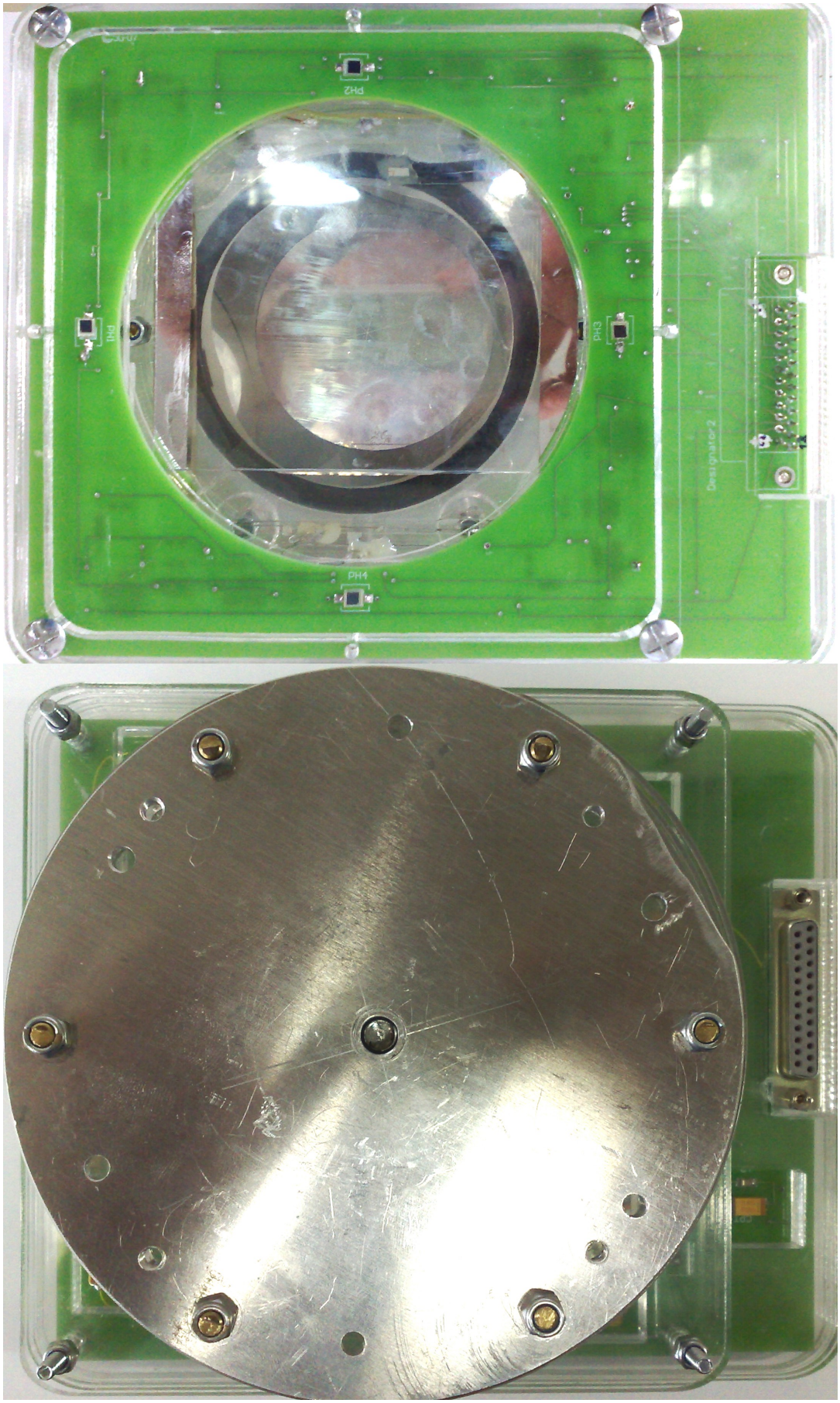


Figura 5-19. Vista frontal y posterior del retromodulador.

5.5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este apartado se muestra una serie de resultados experimentales obtenidos tras diversas pruebas de laboratorio de todo el sistema de comunicación, que incluye todos los elementos vistos a lo largo del capítulo.

5.5.1. Equipo utilizado en las pruebas

Para llevar a cabo las pruebas de laboratorio se hizo uso de una serie de elementos adicionales a los ya descritos a lo largo del capítulo. Hasta ahora se ha descrito el equipo transmisor que iría a bordo de un terminal en movimiento. En las pruebas de laboratorio la estación base receptora estuvo compuesta por una fuente láser y un receptor del SOP conectado a un osciloscopio para la visualización de las señales adquiridas.

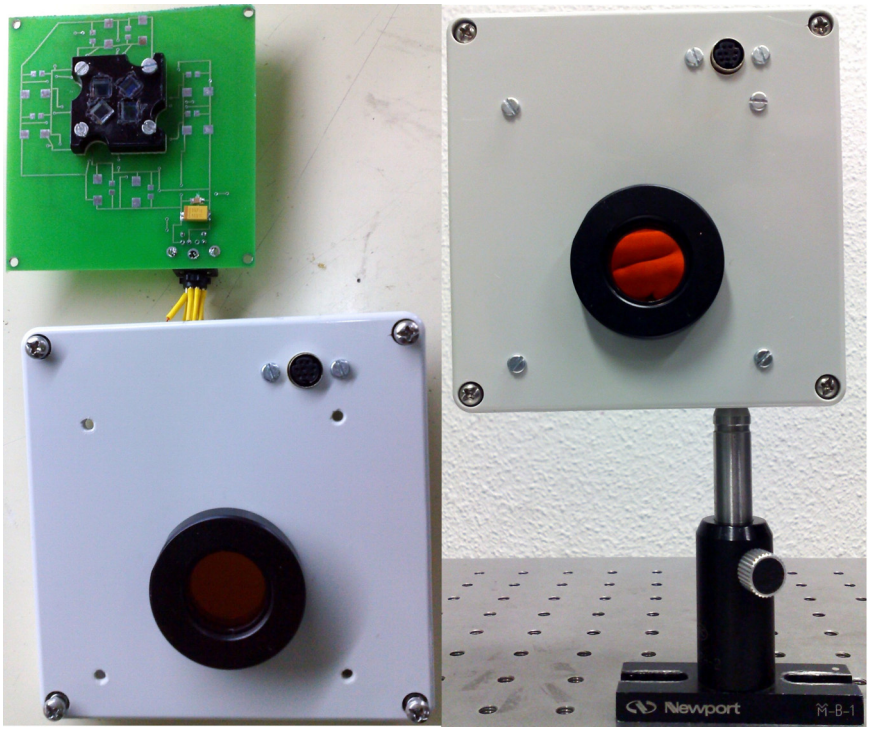


Figura 5-20. Receptor del SOP.

El principio de funcionamiento del receptor se basa en el detector del SOP explicado en el apartado 3.6. El estado de polarización puede deducirse a partir de cuatro medidas del mismo haz correspondientes a su parte horizontal, vertical, a 45º y circular. Para ello, justo antes de los fotodetectores se colocan un polarizador horizontal, uno vertical, uno a 45º y otro circular respectivamente. El último está formado por una lámina cuarto de onda precedida de un polarizador lineal.

La implementación electrónica se basa en cuatro circuitos amplificadores similares a los del apartado 5.3. Por último, a la entrada del receptor se colocó un filtro óptico de una pulgada de diámetro de 630nm de longitud de onda central y 10nm de

anchura espectral, que consigue eliminar completamente cualquier ruido ajeno a la señal de la fuente láser.

En la Figura 5-20 puede apreciarse el receptor del SOP. A la izquierda se presenta abierto y se observa el montaje de los polarizadores atornillado sobre la PCB justo antes de los fotodetectores. También puede verse el filtro óptico a la entrada del receptor y a la derecha el conjunto cerrado en una caja sellada para asegurar que la única fuente de luz que entra lo hace a través del filtro.

El láser utilizado fue el modelo 1125P de Helio-Neón de la marca *JDS Uniphase* que genera un haz de 10mW de potencia a una longitud de onda de 632,8nm, correspondiente al color rojo del espectro visible. Por último, el osciloscopio (Figura 5-21), al que se conectaron cada una de las cuatro señales de salida del receptor del SOP, fue el *Infiniium* MS08104A de *Agilent Technologies*.

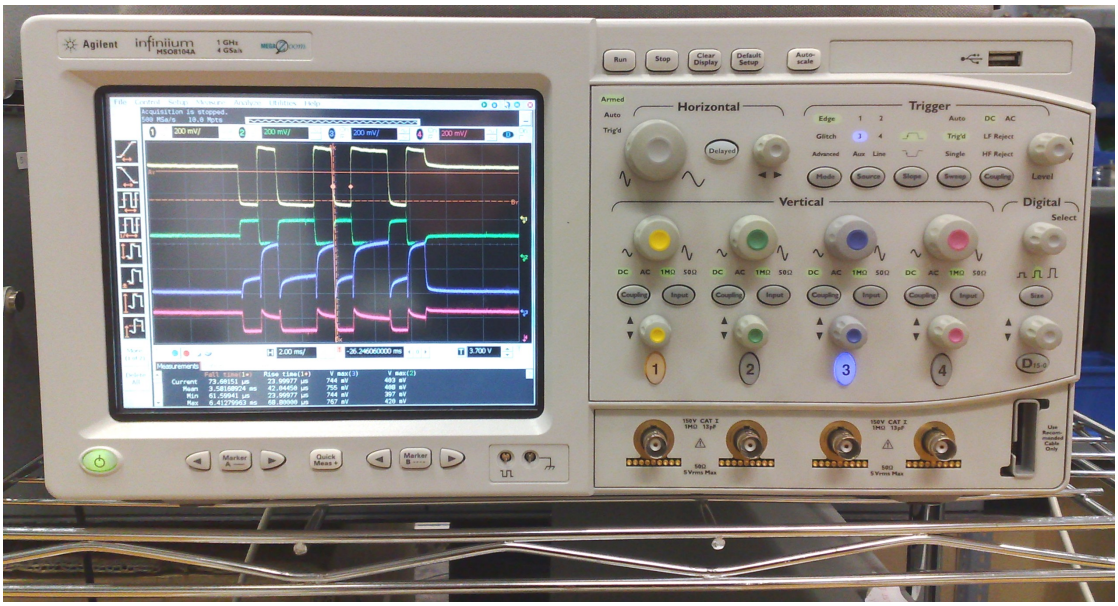


Figura 5-21. Osciloscopio Infiniium MS08104A de Agilent Technologies.

5.5.2. Montaje experimental

En la Figura 5-22 se muestran los distintos elementos que se utilizaron para realizar las pruebas de laboratorio. El montaje se dispuso sobre una mesa óptica antivibratoria y estuvo compuesto por los siguientes elementos (nombrados en orden desde la fuente al receptor):

- Láser emisor.
- Polarizador lineal.
- Divisor de haz 50/50.
- Retromodulador.
- Lente.
- Receptor del SOP.

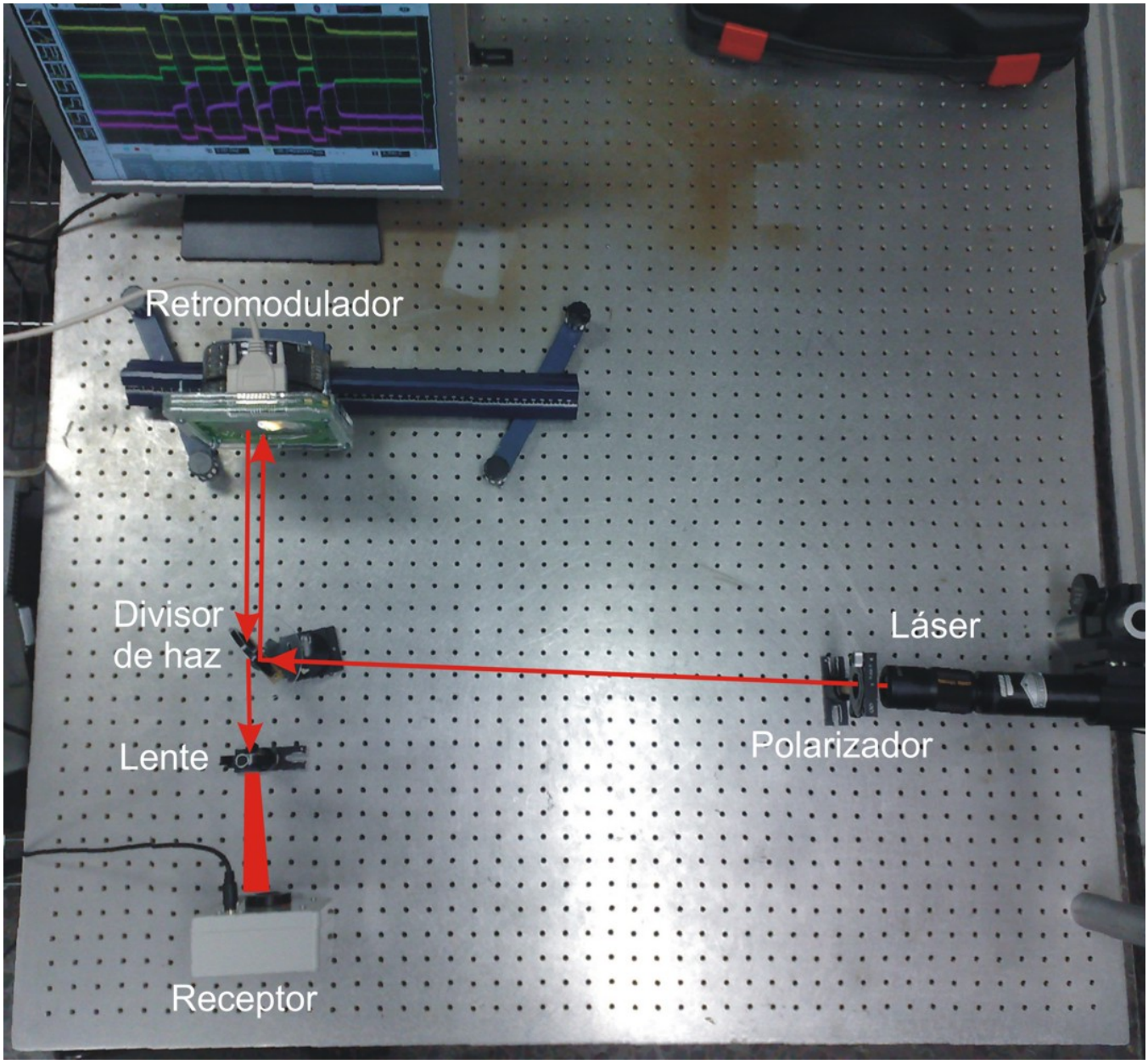


Figura 5-22. Montaje experimental para las pruebas de laboratorio.

En el montaje se separaron físicamente los dos elementos que componen el receptor, esto es, fuente láser y detector del SOP, dado que la poca distancia del enlace que imponía la mesa óptica era insuficiente para que el haz divergiera lo suficiente como para situarlos juntos. Para ello se utilizó un divisor de haz, que facilitó el tratamiento de cada señal en diferentes sitios de la mesa.

5.5.3. Resultados de las pruebas

En este apartado se ofrecen los resultados finales obtenidos en las pruebas que se hicieron en el montaje descrito en el apartado anterior.

Se comenzó atacando a las células de CL con pulsos de ±10V, como los descritos en el apartado 5.4.4, de diferentes frecuencias. Así mismo, se obtuvieron los resultados correspondientes a dos temperaturas diferentes de las células de CL, para comprobar el correcto funcionamiento del control de temperatura del retromodulador.

Se observa en las pruebas que a la temperatura de 50ºC, establecida por el control de temperatura, el CL responde mucho más rápido que a 20ºC, cuando el control de temperatura no está en funcionamiento.

Las cuatro señales obtenidas en el osciloscopio se corresponden según su color con las de las siguientes salidas del receptor:

- Componente vertical: señal amarilla.
- Componente horizontal: señal verde.
- Componente a 45º: señal rosa.
- Componente circular: señal violeta.

A continuación se muestran las diferentes pantallas capturadas en el osciloscopio tras realizar las pruebas a las frecuencias de 1kHz y 10kHz para 20ºC y 50ºC. Por último, al final del apartado se evalúan los resultados y se discuten algunas consecuencias que se desprenden de ellos.

Figura 5-23. Señales de los fotodiodos del receptor para una señal moduladora de 1kHz y una temperatura de 20ºC.

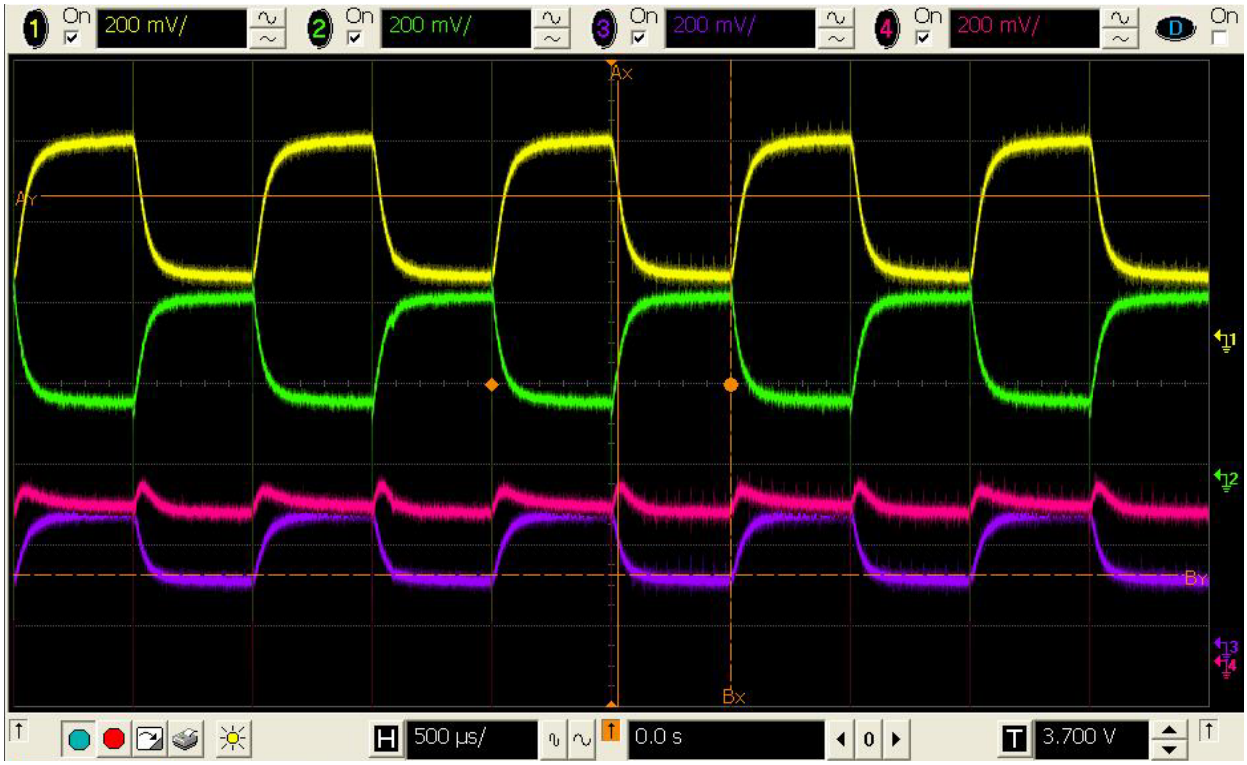


Figura 5-24. Señales de los fotodiodos del receptor para una señal moduladora de 1kHz y una temperatura de 50ºC.

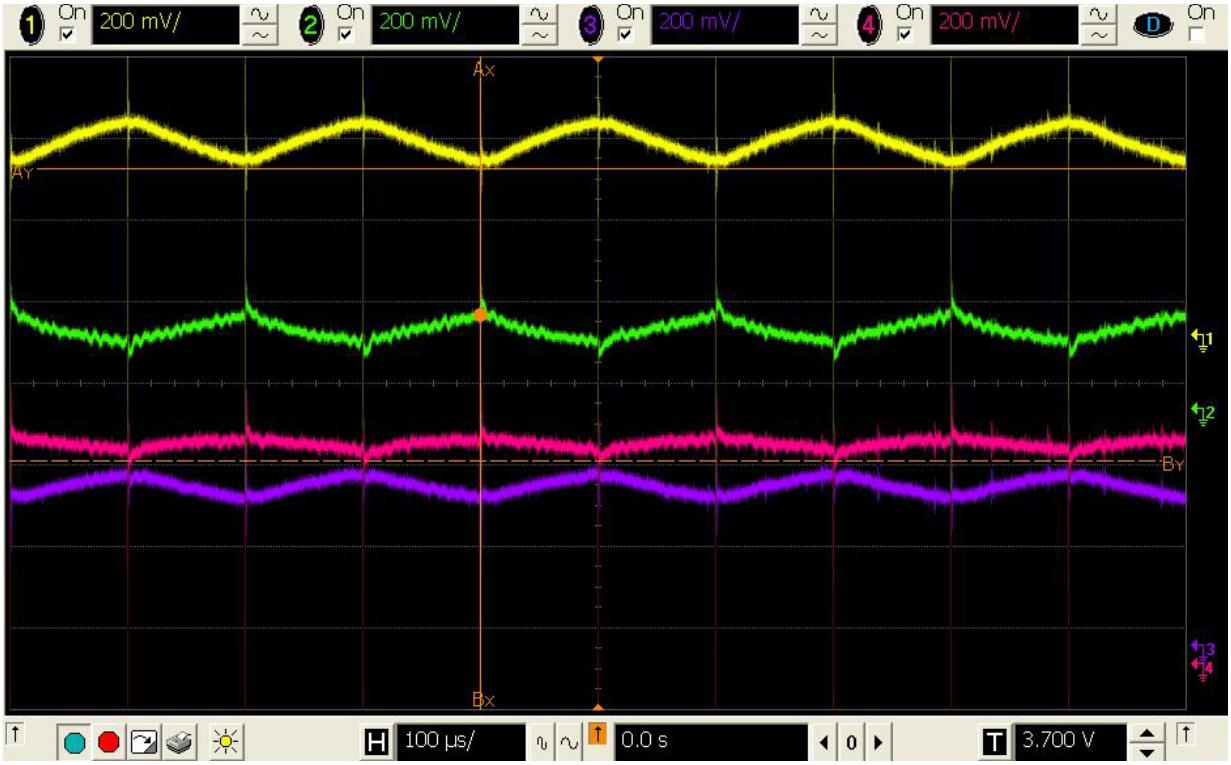


Figura 5-25. Señales de los fotodiodos del receptor para una señal moduladora de 10kHz y una temperatura de 20ºC.

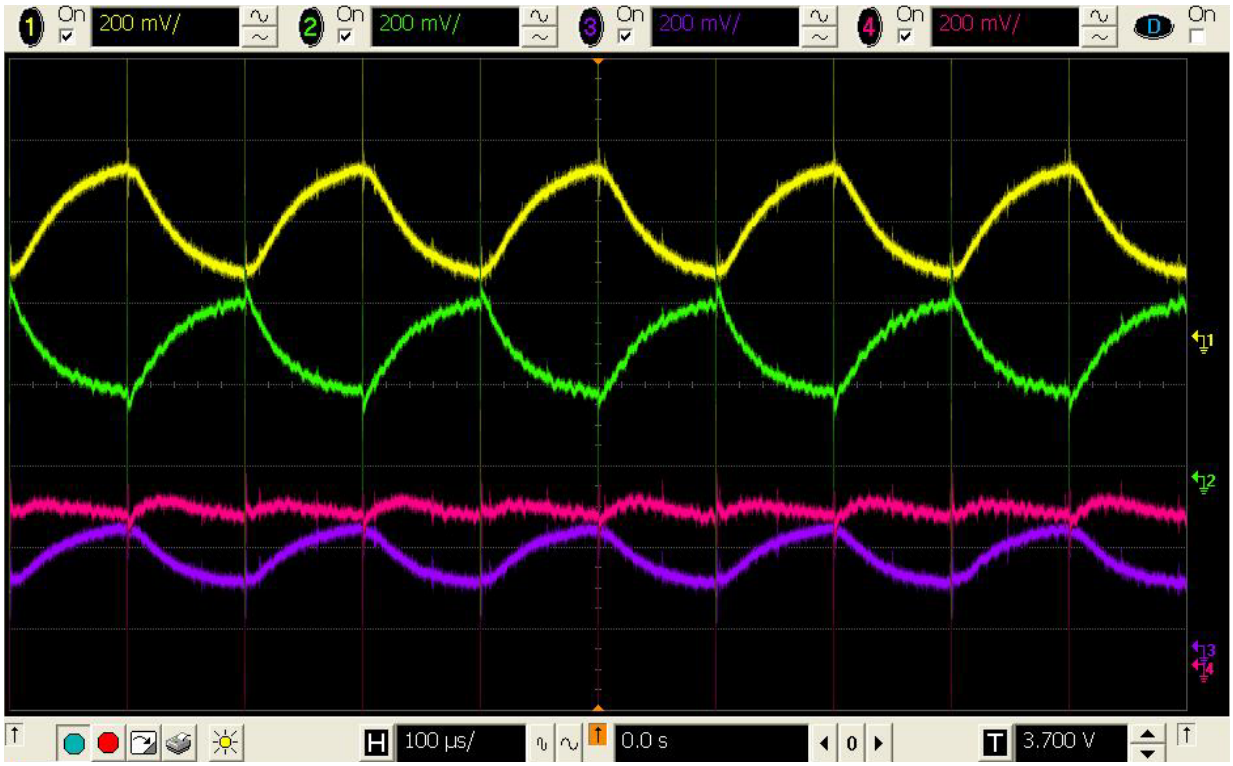


Figura 5-26. Señales de los fotodiodos del receptor para una señal moduladora de 10kHz y una temperatura de 50ºC.

Como se observa, cuanto mayor es la frecuencia con que se ataca a las células de CL, mayor es la dificultad de distinguir entre unos y ceros en los pulsos de salida del receptor al aumentar los tiempos de subida y bajada. Las tasas binarias de 10kbps pueden ser detectadas correctamente siempre que el control de temperatura mantenga a las pantallas de CL a la temperatura adecuada.

Observando las cuatro señales del receptor es posible, a simple vista y sin más procesamiento de las señales, deducir los dos SOPs que se están modulando en las pruebas. Dado que las componentes vertical y horizontal van en contrafase y que la componente a 45º apenas varía, se deduce que los SOPs están alineados casi perfectamente verticales y horizontales. Si se observan los cambios en la componente circular también se puede deducir que los SOPs no son lineales, sino elípticos, ya que se producen cambios en su amplitud. Dado que los cambios son de dos distintos niveles de amplitud positiva y las señales pueden variar entre $\pm V_{máx}$, está claro que cada SOP tiene un distinto grado de elipticidad, pero del mismo sentido de giro.

A continuación se muestran los resultados de las pruebas tras atacar las células de CL con tramas de bits en lugar de trenes de pulsos. La trama de bits está formada por un byte de datos aleatorios precedido por un bit de arranque y uno de parada.

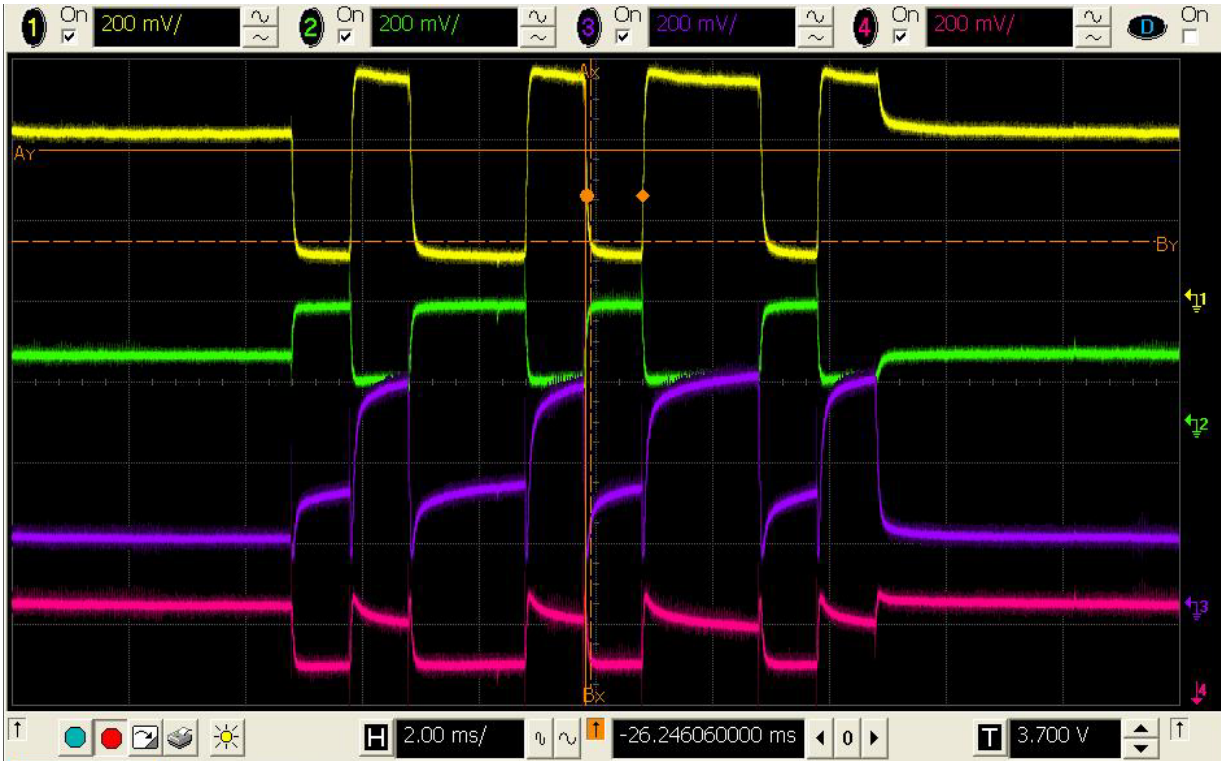


Figura 5-27. Señales de los fotodiodos del receptor para una trama moduladora de 1kHz y una temperatura de 50ºC.

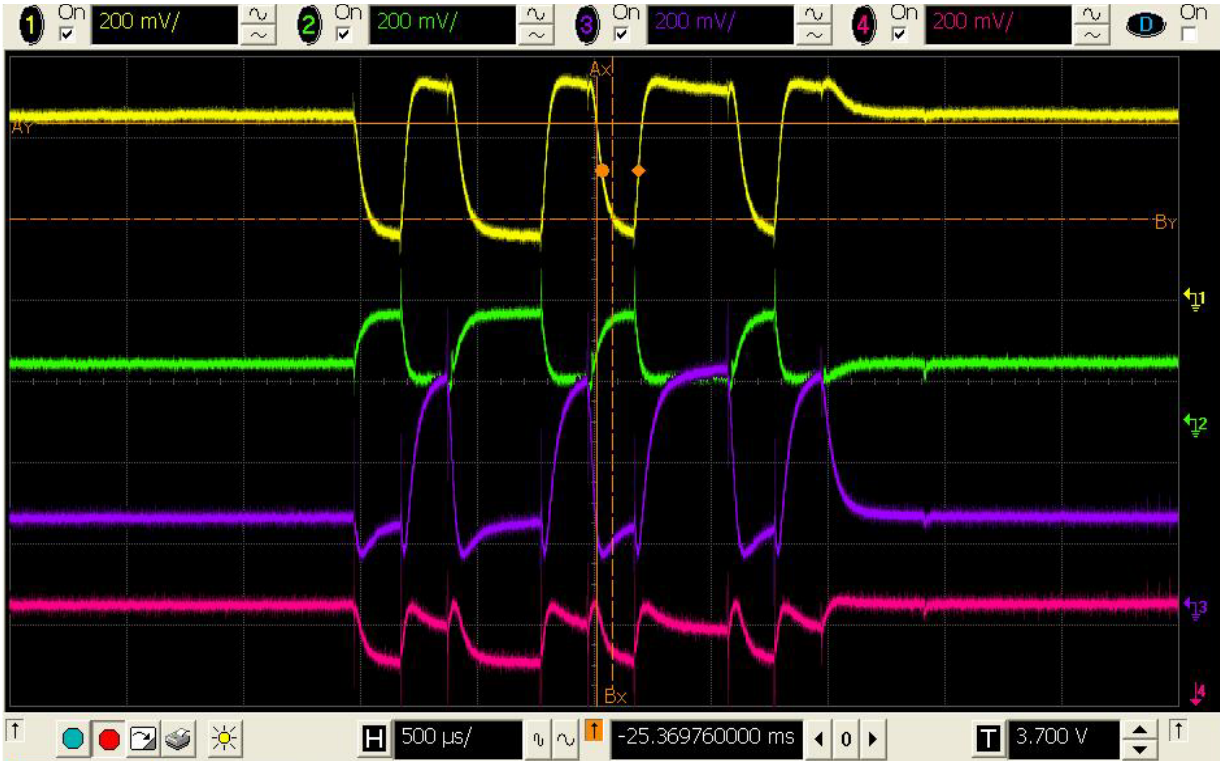


Figura 5-28. Señales de los fotodiodos del receptor para una trama moduladora de 5kHz y una temperatura de 50ºC.

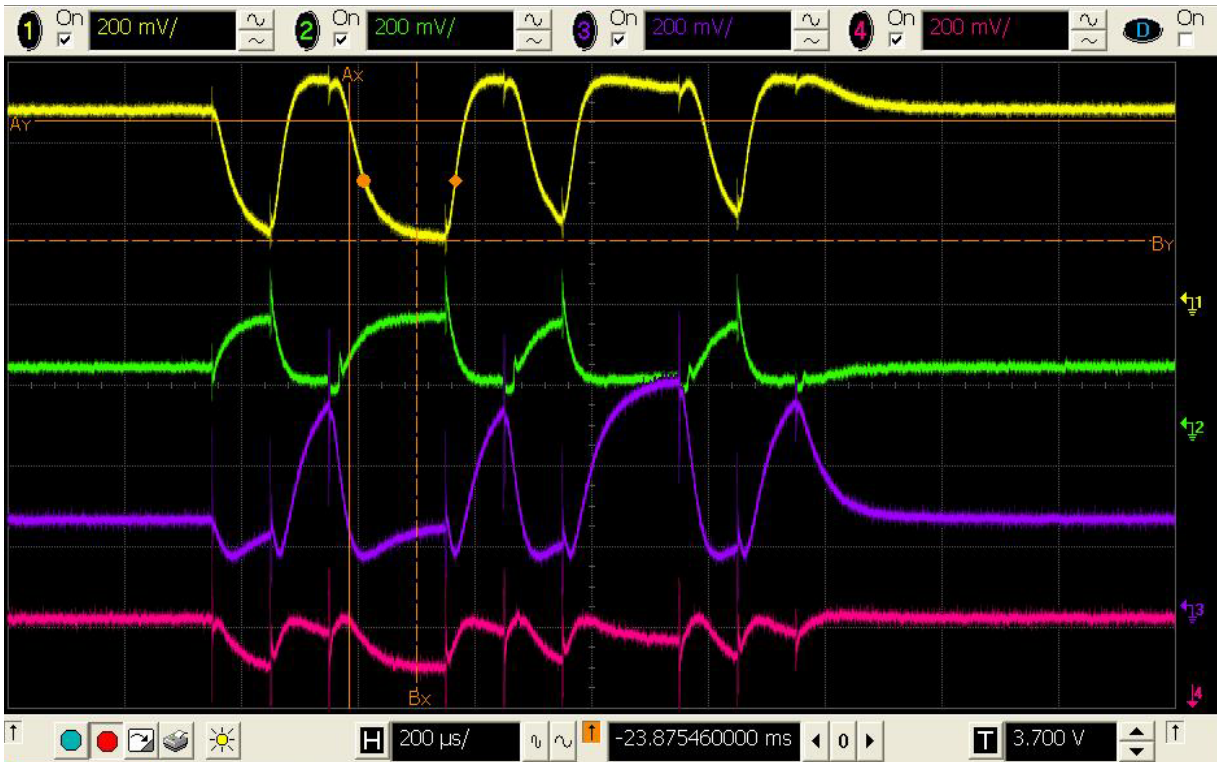


Figura 5-29. Señales de los fotodiodos del receptor para una trama moduladora de 10kHz y una temperatura de 50ºC.

5.5.4. Análisis de los resultados

Se ha demostrado una velocidad de transferencia de 10kbps utilizando una modulación de dos símbolos. Es decir la velocidad de conmutación del CL utilizado ha llegado hasta aproximadamente 10kHz proporcionando transiciones distinguibles. La principal limitación del sistema la impone la velocidad de conmutación de las células de CL, por lo que sería recomendable investigar con otros materiales más rápidos, con los que directamente la velocidad de transferencia aumentaría en la medida que lo permitiera el nuevo material.

Por otra parte, se podría aumentar la tasa binaria del sistema si se utilizara un mayor número de símbolos en la modulación por encima de los dos utilizados en las pruebas. El detector del SOP puede distinguir correctamente los diferentes estados de polarización y el retromodulador está perfectamente capacitado para hacer funcionar a las dos pantallas de CL independientemente generando de forma analógica casi cualquier SOP dentro de las limitaciones de que el material no es perfectamente ortocónico. Por lo tanto sería recomendable generar constelaciones de más símbolos, con lo que se podría aumentar la tasa binaria en la medida que se puedan distinguir en el receptor los distintos símbolos de la constelación.

6. Conclusiones y líneas futuras

6.1. CONCLUSIONES

- Se ha realizado un estudio completo de un enlace de comunicaciones basado en retromodulador en el que se demuestra la viabilidad de este tipo de sistema que aporta importantes ventajas en términos de simplicidad y ligereza del terminal remoto.

- Se ha ofrecido una nueva técnica de modulación de información consistente en añadir datos sobre un haz láser en términos de diferentes estados de polarización de la luz.

- Se ha propuesto la utilización de un modulador formado por dos pantallas de CL en paralelo con el fin de alcanzar cualquier SOP posible, lo que significa una cobertura potencial del 100% de la esfera de Poincaré.

- Se ha planteado la utilización de un receptor que detectaría los diferentes SOPs de un haz láser incidente mediante el análisis de sus componentes dividiéndolas en cuatro señales.

- Se han llevado a cabo una serie de simulaciones del sistema en las que se contempla un caso ideal en el que el retromodulador se encuentra en reposo y la incidencia es perpendicular. Para este caso se han planteado varias configuraciones alternativas y se ha elegido la óptima en términos de máxima superficie de esfera de Poincaré cubierta.

- Se han caracterizado diferentes cristales líquidos con el fin de encontrar el más adecuado para los propósitos del retromodulador. Asímismo, los resultados de las caracterizaciones se han incluido en las simulaciones obteniendo comportamientos más cercanos a la realidad.

- Se han identificado los efectos que tendría sobre la modulación el hecho de que el retromodulador se encontrara en movimiento libre. Este estudio tiene en cuenta todos los movimientos posibles del terminal remoto y los traduce a variaciones angulares del haz incidente.

- Se ha simulado el sistema completo que tiene en cuenta todos los posibles factores que se encontraría el prototipo real en una prueba experimental. Se han discutido las diferentes configuraciones eligiendo nuevamente la óptima y se ha analizado.

- Se han ofrecido estrategias a seguir en el diseño de un retromodulador destinado a operar en un terminal en movimiento libre a la vista de los resultados de la simulación para todos los movimientos posibles del terminal remoto.

- Se ha analizado un escenario en el que el retromodulador se acomoda de forma perfecta a las necesidades del enlace: a bordo de satélites geoestacionarios. En este caso, la retromodulación ofrece, no solo un sistema simple, ligero y de bajo consumo, sino que la modulación se hace óptima ofreciendo la posibilidad de emplear constelaciones de un gran número de símbolos, con lo que la tasa binaria se podría incrementar arbitrariamente.

- Se ha implementado un retromodulador completo con el fin de realizar pruebas experimentales que validen los resultados de las simulaciones.

- Se ha desarrollado un modulador basado en dos pantallas de CL del material elegido tras las caracterizaciones y se le ha dotado de un control de temperatura que lo mantiene en su condición de funcionamiento óptimo.

- Se ha diseñado una placa de circuito impreso para ubicar los distintos circuitos electrónicos así como una estructura en la que se alojan el retrorreflector, el modulador y la PCB. El conjunto se ha conectado a un sistema de control/adquisición que gobierna el comportamiento del retromodulador.

- Se ha demostrado en una serie de pruebas de laboratorio el correcto funcionamiento del sistema de comunicación basado en retromodulador obteniendo tasas binarias de 10kbps. La configuración utilizada ha sido del tipo incidencia perpendicular con una modulación de dos SOPs.

6.2. LÍNEAS FUTURAS

La línea futura más directa sería la utilización del prototipo desarrollado, esta vez en un enlace de comunicación en el que el retromodulador se alojara a bordo de un terminal remoto en movimiento. Como se concluyó en el estudio de las simulaciones del retromodulador en movimiento libre, la variación de los SOPs con los movimientos del terminal remoto es altamente no lineal, por lo que para obtener altas prestaciones del retromodulador haría falta una caracterización angular exhaustiva del mismo. Una alternativa más inmediata sería la utilización de ráfagas de referencia en las que se transmitirían periódicamente todos los SOPs de la constelación utilizada. De esta manera en todo momento se sabría qué símbolo corresponde a cada SOP y se podrían usar constelaciones de varios símbolos aumentando la tasa binaria del enlace.

Una aplicación más simple que la anterior para el retromodulador desarrollado sería el incremento progresivo del número de símbolos de la constelación, manteniendo al terminal estático con un ángulo de incidencia constante. Como se ha explicado, esta configuración simula a un enlace entre la estación base y el retromodulador alojado en un satélite geoestacionario. Por supuesto esta configuracion encontraría también aplicación en cualquier escenario en el que se precise simplicidad, ligereza y bajo consumo en el terminal remoto permaneciendo éste estático.

Como consecuencia directa de lo anterior también sería recomendable explorar las posibilidades y limitaciones del enlace en cuanto a distancia cubierta. Dado que la principal ventaja que ofrecen las comunicaciones ópticas no guiadas se traduce en la mínima divergencia del haz de un láser, esta distancia puede ser arbitrariamente grande sin más que aumentar la potencia del láser. Al aumentar la distancia surgen determinados problemas que no se abordan en este proyecto y que tendrían interés en el caso del desarrollo del sistema para su uso a largas distancias. Estos problemas estarían relacionados con la dificultad en el apuntamiento, el efecto de la atmósfera sobre el haz

del láser o el ruido de fondo especialmente a la luz del día y con apuntamientos cercanos al sol.

La principal limitación de velocidad del enlace la impone la lenta conmutación del CL, por lo que la investigación de diferentes CL más rápidos sería altamente recomendable con el fin de aumentar la capacidad del enlace.

Una última línea futura posible, aunque más alejada de le tecnología estudiada en este proyecto, la constituiría el desarrollo de un retromodulador de electroabsorción, típicamente basado en MQW, que ofrece las ventajas del retromodulador de CL pero aportando tasas binarias varios órdenes de magnitud superiores.

Apéndice I: Listados Maple

I.1. MODULACIÓN DE AMPLITUD OOK

```
> restart:
> StEnt:=<1,0,0,0>:
> RR:=<<1|0|0|0>,<0|1|0|0>,<0|0|-1|0>,<0|0|0|-1>>:
> Pol:=proc(beta)
(1/2)*<<1|cos(2*beta)|sin(2*beta)|0>,<cos(2*beta)|(cos(2*be
ta))^2|sin(2*beta)*cos(2*beta)|0>,<sin(2*beta)|sin(2*beta)*
cos(2*beta)|(sin(2*beta))^2|0>,<0|0|0|0>>;
end proc:
> Pol45:=Pol(Pi/4):
> Ret:=proc(delta)
<<1|0|0|0>,<0|1|0|0>,<0|0|cos(delta)|-
sin(delta)>,<0|0|sin(delta)|cos(delta)>>;
```

```
end proc:
> Rot:=proc(gamma)
<<1|0|0|0>,<0|cos(2*gamma)|-
sin(2*gamma)|0>,<0|sin(2*gamma)|cos(2*gamma)|0>,<0|0|0|1>>;
end proc:
> CL:=proc(phi,delta)
Rot(phi).Ret(delta).Rot(-phi)
end proc:
> CLOFF:=CL(0,Pi/2):
> CLON:=CL(Pi/4,Pi/2):
> StSalOFF:=Pol45.CLON.RR.CLON.Pol45.StEnt;
> StSalON:=Pol45.CLOFF.RR.CLOFF.Pol45.StEnt;
```

I.2. MODULACIÓN DE AMPLITUD M-ASK

```
> restart:
> StEnt:=<1,0,0,0>:
> RR:=<<1|0|0|0>,<0|1|0|0>,<0|0|-1|0>,<0|0|0|-1>>:
> Pol:=proc(beta)
(1/2)*<<1|cos(2*beta)|sin(2*beta)|0>,<cos(2*beta)|(cos(2*be
ta))^2|sin(2*beta)*cos(2*beta)|0>,<sin(2*beta)|sin(2*beta)*
cos(2*beta)|(sin(2*beta))^2|0>,<0|0|0|0>>;
end proc:
> Pol45:=Pol(Pi/4):
> Ret:=proc(delta)
<<1|0|0|0>,<0|1|0|0>,<0|0|cos(delta)|-
sin(delta)>,<0|0|sin(delta)|cos(delta)>>;
end proc:
> Rot:=proc(gamma)
<<1|0|0|0>,<0|cos(2*gamma)|-
sin(2*gamma)|0>,<0|sin(2*gamma)|cos(2*gamma)|0>,<0|0|0|1>>;
end proc:
> CL:=proc(phi,delta)
Rot(phi).Ret(delta).Rot(-phi)
end proc:
> CL1:=CL(0,Pi/2):
> CL2:=CL(Pi/12,Pi/2):
> CL3:=CL(Pi/6,Pi/2):
> CL4:=CL(Pi/4,Pi/2):
> StSal1:=Pol45.CL1.RR.CL1.Pol45.StEnt;
> StSal2:=Pol45.CL2.RR.CL2.Pol45.StEnt;
> StSal3:=Pol45.CL3.RR.CL3.Pol45.StEnt;
> StSal4:=Pol45.CL4.RR.CL4.Pol45.StEnt;
```

I.3. MODULACIÓN DE SOPS LINEALES CON UN CL

```
> restart:
> StEnt:=<1,0,0,0>:
> RR:=<<1|0|0|0>,<0|1|0|0>,<0|0|-1|0>,<0|0|0|-1>>:
> Pol:=proc(beta)
(1/2)*<<1|cos(2*beta)|sin(2*beta)|0>,<cos(2*beta)|(cos(2*be
ta))^2|sin(2*beta)*cos(2*beta)|0>,<sin(2*beta)|sin(2*beta)*
cos(2*beta)|(sin(2*beta))^2|0>,<0|0|0|0>>;
end proc:
> PolHor:=Pol(0):
> phi:=(Pi/4)*(V/Vmax):
> Ret:=proc(delta)
<<1|0|0|0>,<0|1|0|0>,<0|0|cos(delta)|-
sin(delta)>,<0|0|sin(delta)|cos(delta)>>;
end proc:
> Rot:=proc(gamma)
<<1|0|0|0>,<0|cos(2*gamma)|-
sin(2*gamma)|0>,<0|sin(2*gamma)|cos(2*gamma)|0>,<0|0|0|1>>;
end proc:
> CL:=proc(phi,delta)
Rot(phi).Ret(delta).Rot(-phi)
end proc:
>StSal:=subs(delta=Pi,Vmax=4,CL(-
phi,delta).PolHor.RR.PolHor.CL(phi,delta).StEnt):
> with(plottools): with(plots):
> SOP:=StSal:
>
DOP:=(sqrt((SOP[2])^2+(SOP[3])^2+(SOP[4])^2))/((SOP[1])^2):
> SOP:=SOP*DOP:
> SOP_Pcre:=<SOP[2],SOP[3],SOP[4]>:
>SOP_Pcre1:=subs(V=0,SOP_Pcre):SOP_Pcre1:=sphere([SOP_Pcre1
[1],SOP_Pcre1[2],SOP_Pcre1[3]],0.04):
> SOP_Pcre2:=subs(V=-
4,SOP_Pcre):SOP_Pcre2:=sphere([SOP_Pcre2[1],SOP_Pcre2[2],SO
P_Pcre2[3]],0.04):
>SOP_Pcre3:=subs(V=2,SOP_Pcre):SOP_Pcre3:=sphere([SOP_Pcre3
[1],SOP_Pcre3[2],SOP_Pcre3[3]],0.04):
> SOP_Pcre4:=subs(V=-
2,SOP_Pcre):SOP_Pcre4:=sphere([SOP_Pcre4[1],SOP_Pcre4[2],SO
P_Pcre4[3]],0.04):
> SOP_Pcre:=plot3d((SOP_Pcre,V=-4..4,x=-4..4,thickness=6)):
>Esfera:=plot3d([0.99*cos(phi000)*sin(theta),0.99*sin(phi00
0)*sin(theta),0.99*cos(theta)],phi000=0..2*Pi,theta=0..Pi,s
tyle=wireframe,thickness=3):
>
display({Esfera,SOP_Pcre,SOP_Pcre1,SOP_Pcre2,SOP_Pcre3,SOP_
Pcre4},labels=["s1","s2","s3"],scaling=constrained,axes=box
ed,projection=0.9);
```

I.4. MODULACIÓN DE SOPS ELÍPTICOS CON UN CL

```
> restart:
> StEnt:=<1,0,0,0>:
> RR:=<<1|0|0|0>,<0|1|0|0>,<0|0|-1|0>,<0|0|0|-1>>:
> Pol:=proc(beta)
(1/2)*<<1|cos(2*beta)|sin(2*beta)|0>,<cos(2*beta)|(cos(2*be
ta))^2|sin(2*beta)*cos(2*beta)|0>,<sin(2*beta)|sin(2*beta)*
cos(2*beta)|(sin(2*beta))^2|0>,<0|0|0|0>>;
end proc:
> PolHor:=Pol(0):
> phi:=(Pi/4)*(V/Vmax):
> Ret:=proc(delta)
<<1|0|0|0>,<0|1|0|0>,<0|0|cos(delta)|-
sin(delta)>,<0|0|sin(delta)|cos(delta)>>;
end proc:
> Rot:=proc(gamma)
<<1|0|0|0>,<0|cos(2*gamma)|-
sin(2*gamma)|0>,<0|sin(2*gamma)|cos(2*gamma)|0>,<0|0|0|1>>;
end proc:
> CL:=proc(phi,delta)
Rot(phi).Ret(delta).Rot(-phi)
end proc:
> StSal:=subs(delta=Pi/2,Vmax=4,CL(-
phi,delta).PolHor.RR.PolHor.CL(phi,delta).StEnt):
> with(plottools): with(plots):
> SOP:=StSal:
>
DOP:=(sqrt((SOP[2])^2+(SOP[3])^2+(SOP[4])^2))/((SOP[1])^2):
> SOP:=SOP*DOP:
> SOP_Pcre:=<SOP[2],SOP[3],SOP[4]>:
>SOP_Pcre1:=subs(V=4,SOP_Pcre):SOP_Pcre1:=sphere([SOP_Pcre1
[1],SOP_Pcre1[2],SOP_Pcre1[3]],0.04):
> SOP_Pcre2:=subs(V=-
4,SOP_Pcre):SOP_Pcre2:=sphere([SOP_Pcre2[1],SOP_Pcre2[2],SO
P_Pcre2[3]],0.04):
>SOP_Pcre3:=subs(V=1,SOP_Pcre):SOP_Pcre3:=sphere([SOP_Pcre3
[1],SOP_Pcre3[2],SOP_Pcre3[3]],0.04):
> SOP_Pcre4:=subs(V=-
1,SOP_Pcre):SOP_Pcre4:=sphere([SOP_Pcre4[1],SOP_Pcre4[2],SO
P_Pcre4[3]],0.04):
> SOP_Pcre:=plot3d((SOP_Pcre,V=-4..4,x=-4..4,thickness=6)):
>Esfera:=plot3d([0.98*cos(phi000)*sin(theta),0.98*sin(phi00
0)*sin(theta),0.98*cos(theta)],phi000=0..2*Pi,theta=0..Pi,s
tyle=wireframe,thickness=3):
>display({Esfera,SOP_Pcre,SOP_Pcre1,SOP_Pcre2,SOP_Pcre3,SOP
_Pcre4},labels=["s1","s2","s3"],scaling=constrained,axes=bo
xed,projection=0.9);
```

I.5. MODULACIÓN DE SOPS CON DOS CL Y POLARIZADOR

```
> restart:
> StEnt:=<1,0,0,0>:
> RR:=<<1|0|0|0>,<0|1|0|0>,<0|0|-1|0>,<0|0|0|-1>>:
> Pol:=proc(beta)
(1/2)*<<1|cos(2*beta)|sin(2*beta)|0>,<cos(2*beta)|(cos(2*be
ta))^2|sin(2*beta)*cos(2*beta)|0>,<sin(2*beta)|sin(2*beta)*
cos(2*beta)|(sin(2*beta))^2|0>,<0|0|0|0>>;
end proc:
> PolHor:=Pol(0):
> phi1:=(Pi/4)*(V1/Vmax):
> phi2:=(Pi/4)*(V2/Vmax):
> Ret:=proc(delta)
<<1|0|0|0>,<0|1|0|0>,<0|0|cos(delta)|-
sin(delta)>,<0|0|sin(delta)|cos(delta)>>;
end proc:
> Rot:=proc(gamma)
<<1|0|0|0>,<0|cos(2*gamma)|-
sin(2*gamma)|0>,<0|sin(2*gamma)|cos(2*gamma)|0>,<0|0|0|1>>;
end proc:
> CL:=proc(phi,delta)
Rot(phi).Ret(delta).Rot(-phi)
end proc:
> StSal:=subs(delta1=Pi/2,delta2=Pi,Vmax=4,CL(-
phi1,delta1).CL(-
phi2,delta2).PolHor.RR.PolHor.CL(phi2,delta2).CL(phi1,delta
1).StEnt):
> with(plottools):
>with(plots):
> SOP:=StSal:
>
DOP:=(sqrt((SOP[2])^2+(SOP[3])^2+(SOP[4])^2))/((SOP[1])^2):
> SOP:=SOP*DOP:
> SOP_Pcre:=<SOP[2],SOP[3],SOP[4]>:
> SOP_PcreTot:=plot3d((SOP_Pcre,V1=-4..4,V2=-
4..4,thickness=6)):
>Esfera:=plot3d([0.98*cos(phi000)*sin(theta),0.98*sin(phi00
0)*sin(theta),0.98*cos(theta)],phi000=0..2*Pi,theta=0..Pi,s
tyle=wireframe,thickness=3):
>display({Esfera,SOP_PcreTot},labels=["s1","s2","s3"],scali
ng=constrained,axes=boxed,projection=0.9);
```

I.6. MODULACIÓN DE SOPS CON DOS CL SIN POLARIZADOR

```
> restart:
> StEnt:=<1,0,0,1>:
> RR:=<<1|0|0|0>,<0|1|0|0>,<0|0|-1|0>,<0|0|0|-1>>:
> phi1:=(Pi/4)*(V1/Vmax):
> phi2:=(Pi/4)*(V2/Vmax):
> Ret:=proc(delta)
<<1|0|0|0>,<0|1|0|0>,<0|0|cos(delta)|-
sin(delta)>,<0|0|sin(delta)|cos(delta)>>;
end proc:
> Rot:=proc(gamma)
<<1|0|0|0>,<0|cos(2*gamma)|-
sin(2*gamma)|0>,<0|sin(2*gamma)|cos(2*gamma)|0>,<0|0|0|1>>;
end proc:
> CL:=proc(phi,delta)
Rot(phi).Ret(delta).Rot(-phi)
end proc:
> StSal:=subs(delta1=Pi/2,delta2=Pi/2,Vmax=4,CL(-
phi1,delta1).CL(-
phi2,delta2).RR.CL(phi2,delta2).CL(phi1,delta1).StEnt):
> with(plottools): with(plots):
> SOP:=StSal:
>
DOP:=(sqrt((SOP[2])^2+(SOP[3])^2+(SOP[4])^2))/((SOP[1])^2):
> SOP:=SOP*DOP:
> SOP_Pcre:=<SOP[2],SOP[3],SOP[4]>:
> SOP_PcreTot:=plot3d((SOP_Pcre,V1=-4..4,V2=-
4..4,thickness=6)):
>Esfera:=plot3d([0.98*cos(phi000)*sin(theta),0.98*sin(phi00
0)*sin(theta),0.98*cos(theta)],phi000=0..2*Pi,theta=0..Pi,s
tyle=wireframe,thickness=3):
>display({Esfera,SOP_PcreTot},labels=["s1","s2","s3"],scali
ng=constrained,axes=boxed,projection=0.9);
```

I.7. DETECTOR DEL SOP

```
> restart:
> StEnt:=<1,0.57,-0.23,0.78>;
> Ret:=proc(delta)
<<1|0|0|0>,<0|1|0|0>,<0|0|cos(delta)|-
sin(delta)>,<0|0|sin(delta)|cos(delta)>>;
end proc:
> Ret90:=Ret(Pi/2);
> Pol:=proc(beta)
```

```
(1/2)*<<1|cos(2*beta)|sin(2*beta)|0>,<cos(2*beta)|(cos(2*be
ta))^2|sin(2*beta)*cos(2*beta)|0>,<sin(2*beta)|sin(2*beta)*
cos(2*beta)|(sin(2*beta))^2|0>,<0|0|0|0>>;
end proc:
> Pol45:=Pol(Pi/4);
> Polm45:=Pol(-Pi/4);
> PolHor:=Pol(0);
> PolVer:=Pol(Pi/2);
> i1:=PolHor.StEnt;
i2:=PolVer.StEnt;
i3:=Pol45.StEnt;
i4:=Pol45.Ret90.StEnt;
i5:=Polm45.Ret90.StEnt;
> S0:=i1[1]+i2[1];
S1:=i1[1]-i2[1];
S2:=2*i3[1]-i1[1]-i2[1];
S3:=i1[1]+i2[1]-2*i4[1];
```

I.8. MODULACIÓN DE SOPS CON DOS CL Y POLARIZADOR (ÁNGULO DE CONO DISTINTO DE 90º)

```
> restart:
> StEnt:=<1,0,0,0>:
> RR:=<<1|0|0|0>,<0|1|0|0>,<0|0|-1|0>,<0|0|0|-1>>:
> Pol:=proc(beta)
(1/2)*<<1|cos(2*beta)|sin(2*beta)|0>,<cos(2*beta)|(cos(2*be
ta))^2|sin(2*beta)*cos(2*beta)|0>,<sin(2*beta)|sin(2*beta)*
cos(2*beta)|(sin(2*beta))^2|0>,<0|0|0|0>>;
end proc:
> PolHor:=Pol(0):
> cono1:= > 0.833*(Pi/4):
> cono2:= > 0.833*(Pi/4):
> phi1:=(cono1)*(V1/Vmax):
> phi2:=(cono2)*(V2/Vmax):
> Ret:=proc(delta)
<<1|0|0|0>,<0|1|0|0>,<0|0|cos(delta)|-
sin(delta)>,<0|0|sin(delta)|cos(delta)>>;
end proc:
> Rot:=proc(gamma)
<<1|0|0|0>,<0|cos(2*gamma)|-
sin(2*gamma)|0>,<0|sin(2*gamma)|cos(2*gamma)|0>,<0|0|0|1>>;
end proc:
> CL:=proc(phi,delta)
Rot(phi).Ret(delta).Rot(-phi)
end proc:
> StSal:=subs(delta1=Pi/2,delta2=Pi,Vmax=4,CL(-
phi1,delta1).CL(-
```

```
phi2,delta2).PolHor.RR.PolHor.CL(phi2,delta2).CL(phi1,delta
1).StEnt):
> with(plottools): with(plots):
> SOP:=StSal:
>
DOP:=(sqrt((SOP[2])^2+(SOP[3])^2+(SOP[4])^2))/((SOP[1])^2):
> SOP:=SOP*DOP:
> SOP_Pcre:=<SOP[2],SOP[3],SOP[4]>:
> SOP_PcreTot:=plot3d((SOP_Pcre,V1=-4..4,V2=-
4..4,thickness=6)):
>Esfera:=plot3d([0.98*cos(phi000)*sin(theta),0.98*sin(phi00
0)*sin(theta),0.98*cos(theta)],phi000=0..2*Pi,theta=0..Pi,s
tyle=wireframe,thickness=3):
>display({Esfera,SOP_PcreTot},labels=["s1","s2","s3"],scali
ng=constrained,axes=boxed,projection=0.9);
```

I.9. MODULACIÓN DE SOPS CON DOS CL SIN POLARIZADOR (ÁNGULO DE CONO DE 75º)

```
> restart:
> StEnt:=<1,0,0,1>:
> RR:=<<1|0|0|0>,<0|1|0|0>,<0|0|-1|0>,<0|0|0|-1>>:
> cono1:= > 0.833*(Pi/4):
> cono2:= > 0.833*(Pi/4):
> phi1:=(cono1)*(V1/Vmax):
> phi2:=(cono2)*(V2/Vmax):
> Ret:=proc(delta)
<<1|0|0|0>,<0|1|0|0>,<0|0|cos(delta)|-
sin(delta)>,<0|0|sin(delta)|cos(delta)>>;
end proc:
> Rot:=proc(gamma)
<<1|0|0|0>,<0|cos(2*gamma)|-
sin(2*gamma)|0>,<0|sin(2*gamma)|cos(2*gamma)|0>,<0|0|0|1>>;
end proc:
> CL:=proc(phi,delta)
Rot(phi).Ret(delta).Rot(-phi)
end proc:
> StSal:=subs(delta1=Pi/2,delta2=Pi/2,Vmax=4,CL(-
phi1,delta1).CL(-
phi2,delta2).RR.CL(phi2,delta2).CL(phi1,delta1).StEnt):
> with(plottools): with(plots):
> SOP:=StSal:
>
DOP:=(sqrt((SOP[2])^2+(SOP[3])^2+(SOP[4])^2))/((SOP[1])^2):
> SOP:=SOP*DOP:
> SOP_Pcre:=<SOP[2],SOP[3],SOP[4]>:
```

```
> SOP_PcreTot:=plot3d((SOP_Pcre,V1=-4..4,V2=-
4..4,thickness=6)):
>Esfera:=plot3d([0.98*cos(phi000)*sin(theta),0.98*sin(phi00
0)*sin(theta),0.98*cos(theta)],phi000=0..2*Pi,theta=0..Pi,s
tyle=wireframe,thickness=3):
>display({Esfera,SOP_PcreTot},labels=["s1","s2","s3"],scali
ng=constrained,axes=boxed,projection=0.9);
```

I.10. MODULACIÓN DE SOPS CON DOS CL SIN POLARIZADOR (ÁNGULO DE CONO DE 75º Y ζ DE 65º)

```
> restart:
> StEnt:=<1,0,0,1>:
> RR:=<<1|0|0|0>,<0|1|0|0>,<0|0|-1|0>,<0|0|0|-1>>:
> cono1:= > 0.833*(Pi/4):
> cono2:= > 0.833*(Pi/4):
> alineam1:=0:
> alineam2:=Pi/2.77:
> phi1:=alineam1+(cono1)*(V1/Vmax):
> phi2:=alineam2+(cono2)*(V2/Vmax):
> Ret:=proc(delta)
<<1|0|0|0>,<0|1|0|0>,<0|0|cos(delta)|-
sin(delta)>,<0|0|sin(delta)|cos(delta)>>;
end proc:
> Rot:=proc(gamma)
<<1|0|0|0>,<0|cos(2*gamma)|-
sin(2*gamma)|0>,<0|sin(2*gamma)|cos(2*gamma)|0>,<0|0|0|1>>;
end proc:
> CL:=proc(phi,delta)
Rot(phi).Ret(delta).Rot(-phi)
end proc:
> StSal:=subs(delta1=Pi/2,delta2=Pi/2,Vmax=4,CL(-
phi1,delta1).CL(-
phi2,delta2).RR.CL(phi2,delta2).CL(phi1,delta1).StEnt):
> with(plottools): with(plots):
> SOP:=StSal:
>
DOP:=(sqrt((SOP[2])^2+(SOP[3])^2+(SOP[4])^2))/((SOP[1])^2):
> SOP:=SOP*DOP:
> SOP_Pcre:=<SOP[2],SOP[3],SOP[4]>:
> SOP_PcreTot:=plot3d((SOP_Pcre,V1=-4..4,V2=-
4..4,thickness=6)):
>Esfera:=plot3d([0.98*cos(phi000)*sin(theta),0.98*sin(phi00
0)*sin(theta),0.98*cos(theta)],phi000=0..2*Pi,theta=0..Pi,s
tyle=wireframe,thickness=3):
>display({Esfera,SOP_PcreTot},labels=["s1","s2","s3"],scali
ng=constrained,axes=boxed,projection=0.9);
```

I.11. MODULACIÓN DE SOPS CON DOS CL CON POLARIZADOR (MODELO AMPLIADO DE CL W212)

```
> restart:
> StEnt:=<1,0,0,0>:
> RR:=<<1|0|0|0>,<0|1|0|0>,<0|0|-1|0>,<0|0|0|-1>>:
> Pol:=proc(beta)
(1/2)*<<1|cos(2*beta)|sin(2*beta)|0>,<cos(2*beta)|(cos(2*be
ta))^2|sin(2*beta)*cos(2*beta)|0>,<sin(2*beta)|sin(2*beta)*
cos(2*beta)|(sin(2*beta))^2|0>,<0|0|0|0>>;
end proc:
> PolHor:=Pol(0):
> phi1:=(Pi/180)*(-0.0002*V1^6 -0.0021*V1^5 + 0.0253*V1^4 +
0.0469*V1^3 - 1.032*V1^2 + 15.472*V1 - 3.0235):
> phi2:=(Pi/180)*(-0.0002*V2^6 -0.0021*V2^5 + 0.0253*V2^4 +
0.0469*V2^3 - 1.032*V2^2 + 15.472*V2 - 3.0235):
> delta1:=(Pi/180)*(0.0001*V1^6 + 0.0012*V1^5 - 0.0725*V1^4
- 0.0577*V1^3 + 2.8442*V1^2 - 2.3938*V1 + 70.24):
> delta2:=(Pi/180)*(0.0001*V2^6 + 0.0012*V2^5 - 0.0725*V2^4
- 0.0577*V2^3 + 2.8442*V2^2 - 2.3938*V2 + 70.24):
> Ret:=proc(delta)
<<1|0|0|0>,<0|1|0|0>,<0|0|cos(delta)|-
sin(delta)>,<0|0|sin(delta)|cos(delta)>>;
end proc:
> Rot:=proc(gamma)
<<1|0|0|0>,<0|cos(2*gamma)|-
sin(2*gamma)|0>,<0|sin(2*gamma)|cos(2*gamma)|0>,<0|0|0|1>>;
end proc:
> CL:=proc(phi,delta)
Rot(phi).Ret(delta).Rot(-phi)
end proc:
> StSal:=CL(-phi1,delta1).CL(-
phi2,delta2).PolHor.RR.PolHor.CL(phi2,delta2).CL(phi1,delta
1).StEnt:
> #StSal:=CL(-phi1,delta1).CL(-
phi2,delta2).RR.CL(phi2,delta2).CL(phi1,delta1).StEnt:
> with(plottools): with(plots):
> SOP:=StSal:
DOP:=(sqrt((SOP[2])^2+(SOP[3])^2+(SOP[4])^2))/((SOP[1])^2):
> SOP:=SOP*DOP:
> SOP_Pcre:=<SOP[2],SOP[3],SOP[4]>:
> SOP_PcreTot:=plot3d((SOP_Pcre,V1=-4..3.5,V2=-
2..2,thickness=6)):
>Esfera:=plot3d([0.98*cos(phi000)*sin(theta),0.98*sin(phi00
0)*sin(theta),0.98*cos(theta)],phi000=0..2*Pi,theta=0..Pi,s
tyle=wireframe,thickness=3):
>display({Esfera,SOP_PcreTot},labels=["s1","s2","s3"],scali
ng=constrained,axes=boxed,projection=0.9);
```

I.12. MODULACIÓN DE SOPS CON DOS CL SIN POLARIZADOR (MODELO AMPLIADO DE CL W212)

```
> restart:
> StEnt:=<1,0,0,1>:
> RR:=<<1|0|0|0>,<0|1|0|0>,<0|0|-1|0>,<0|0|0|-1>>:
> phi1:=(Pi/180)*(-0.0002*V1^6 -0.0021*V1^5 + 0.0253*V1^4 +
0.0469*V1^3 - 1.032*V1^2 + 15.472*V1 - 3.0235):
> phi2:=(Pi/180)*(-0.0002*V2^6 -0.0021*V2^5 + 0.0253*V2^4 +
0.0469*V2^3 - 1.032*V2^2 + 15.472*V2 - 3.0235):
> delta1:=(Pi/180)*(0.0001*V1^6 + 0.0012*V1^5 - 0.0725*V1^4
- 0.0577*V1^3 + 2.8442*V1^2 - 2.3938*V1 + 70.24):
> delta2:=(Pi/180)*(0.0001*V2^6 + 0.0012*V2^5 - 0.0725*V2^4
- 0.0577*V2^3 + 2.8442*V2^2 - 2.3938*V2 + 70.24):
> Ret:=proc(delta)
<<1|0|0|0>,<0|1|0|0>,<0|0|cos(delta)|-
sin(delta)>,<0|0|sin(delta)|cos(delta)>>;
end proc:
> Rot:=proc(gamma)
<<1|0|0|0>,<0|cos(2*gamma)|-
sin(2*gamma)|0>,<0|sin(2*gamma)|cos(2*gamma)|0>,<0|0|0|1>>;
end proc:
> CL:=proc(phi,delta)
Rot(phi).Ret(delta).Rot(-phi)
end proc:
> StSal:=CL(-phi1,delta1).CL(-
phi2,delta2).RR.CL(phi2,delta2).CL(phi1,delta1).StEnt:
> with(plottools): with(plots):
> SOP:=StSal:
>DOP:=(sqrt((SOP[2])^2+(SOP[3])^2+(SOP[4])^2))/((SOP[1])^2)
:
> SOP:=SOP*DOP:
> SOP_Pcre:=<SOP[2],SOP[3],SOP[4]>:
> SOP_PcreTot:=plot3d((SOP_Pcre,V1=-2..3.7,V2=-
2..3.7,thickness=6)):
>Esfera:=plot3d([0.98*cos(phi000)*sin(theta),0.98*sin(phi00
0)*sin(theta),0.98*cos(theta)],phi000=0..2*Pi,theta=0..Pi,s
tyle=wireframe,thickness=3):
>display({Esfera,SOP_PcreTot},labels=["s1","s2","s3"],scali
ng=constrained,axes=boxed,projection=0.9);
```

I.13. CONVERSOR JONES-MUELLER

```
> restart;
> with(LinearAlgebra):
> Jin:=<1,0>:
> QWP:=<<1,0>|<0,I>>:
> Rot:=proc(alpha) <<cos(alpha)|-
sin(alpha)>,<sin(alpha)|cos(alpha)>>; end proc:
> Jin45:=Rot(-Pi/4).Jin:
> JinCP:=Rot(-Pi/4).QWP.Jin:
>Ix:=combine(simplify(evalc(Jin[1]*conjugate(Jin[1])),'assu
me=real'),trig):
>Iy:=combine(simplify(evalc(Jin[2]*conjugate(Jin[2])),'assu
me=real'),trig):
>I45:=combine(simplify(evalc(Jin45[1]*conjugate(Jin45[1])),
'assume=real'),trig):
>ICP:=combine(simplify(evalc(JinCP[1]*conjugate(JinCP[1])),
'assume=real'),trig):
> S0:=collect(Ix+Iy,cos):
> S1:=collect(Ix-Iy,cos):
> S2:=collect(2*I45-S0,cos):
> S3:=-collect(2*ICP-S0,cos):
> Sout:=<S0,S1,S2,S3>;
```

I.14. RETROMODULADOR REAL COMPLETO

```
> restart:
> with(LinearAlgebra):
> with(plots):
> RR:=<<1|0|0|0>,<0|1|0|0>,<0|0|-1|0>,<0|0|0|-1>>:
> Rot:=proc(phi)
<<1|0|0|0>,<0|cos(2*phi)|-
sin(2*phi)|0>,<0|sin(2*phi)|cos(2*phi)|0>,<0|0|0|1>>;
end proc:
> Ret:=proc(deltaX)
<<1|0|0|0>,<0|1|0|0>,<0|0|cos(deltaX)|-
sin(deltaX)>,<0|0|sin(deltaX)|cos(deltaX)>>;
end proc:
> RotY:=proc(phi)
<<cos(phi),0,-sin(phi)>|<0,1,0>|<sin(phi),0,cos(phi)>>
end proc:
> N:=<sin(beta)*cos(phi),sin(beta)*sin(phi),cos(beta)>:
> K:=<sin(gamma1),0,cos(gamma1)>:
> theta:=arccos(N[1]*K[1]+N[3]*K[3]):
>neff:=simplify(sqrt(1/(sin(theta)^2/ne^2+cos(theta)^2/no^2
))):
Dn:=neff-no:
```

```
> Nrot:=RotY(-gamma1).N:
> delta:=subs(phi=phi1+phi0,2*Pi*Dn*L/lambda/cos(gamma1)):
> alpha:=subs(phi=phi1+phi0,arctan(-Nrot[2]/Nrot[1])):
>assume(Fx,RealRange(0.5,1),alpha1,RealRange(0,Pi),alpha2,R
ealRange(0,Pi),delta1,RealRange(0,4*Pi),delta2,RealRange(0,
4*Pi)):
> Jlas:=<1,0,0,1>:
> Mtot:=Rot(-alpha1).Ret(delta1).Rot(alpha1).Rot(-
alpha2).Ret(delta2).Rot(alpha2).RR.Rot(alpha2).Ret(delta2).
Rot(-alpha2).Rot(alpha1).Ret(delta1).Rot(-alpha1):
>Mtot2:=<<collect(combine(simplify(Mtot[1,1]),trig),exp)|co
llect(combine(simplify(Mtot[1,2]),trig),exp)|collect(combin
e(simplify(Mtot[1,3]),trig),exp)|collect(combine(simplify(M
tot[1,4]),trig),exp)>,
<collect(combine(simplify(Mtot[2,1]),trig),exp)|collect(com
bine(simplify(Mtot[2,2]),trig),exp)|collect(combine(simplif
y(Mtot[2,3]),trig),exp)|collect(combine(simplify(Mtot[2,4])
,trig),exp)>,
<collect(combine(simplify(Mtot[3,1]),trig),exp)|collect(com
bine(simplify(Mtot[3,2]),trig),exp)|collect(combine(simplif
y(Mtot[3,3]),trig),exp)|collect(combine(simplify(Mtot[3,4])
,trig),exp)>,
<collect(combine(simplify(Mtot[4,1]),trig),exp)|collect(com
bine(simplify(Mtot[4,2]),trig),exp)|collect(combine(simplif
y(Mtot[4,3]),trig),exp)|collect(combine(simplify(Mtot[4,4])
,trig),exp)>>:
> Jout:=Mtot2.Jlas:
> S0ad:=Jout[1]:
S1ad:=Jout[2]:
S2ad:=Jout[3]:
S3ad:=Jout[4]:
> phi01:=(7.672*V-1.871)/180*Pi:
beta1:=(1.498*V^2-0.018*V+49.86)/180*Pi:
> no01:=1.5: ne01:=1.64: lambda01:=632: L01:=1500:
> alpha01:=subs(phi1=phi01,       beta=beta1,V=V1, alpha):
alpha02:=subs(phi1=phi01+phi00, beta=beta1,V=V2, alpha):
> delta01:=evalf(expand(subs(phi1=phi01,
beta=beta1,V=V1,ne=ne01,no=no01,lambda=lambda01,L=L01,
delta))):
delta02:=evalf(expand(subs(phi1=phi01+phi00,
beta=beta1,V=V2,ne=ne01,no=no01,lambda=lambda01,L=L01,
delta))):
>S0:=subs(alpha1=alpha01,delta1=delta01,alpha2=alpha02,delt
a2=delta02,subs(alpha1=alpha01,delta1=delta01,alpha2=alpha0
2,delta2=delta02, S0ad)):
>S1:=subs(alpha1=alpha01,delta1=delta01,alpha2=alpha02,delt
a2=delta02,subs(alpha1=alpha01,delta1=delta01,alpha2=alpha0
2,delta2=delta02, S1ad)):
```

```
>S2:=subs(alpha1=alpha01,delta1=delta01,alpha2=alpha02,delt
a2=delta02,subs(alpha1=alpha01,delta1=delta01,alpha2=alpha0
2,delta2=delta02, S2ad)):
>S3:=subs(alpha1=alpha01,delta1=delta01,alpha2=alpha02,delt
a2=delta02,subs(alpha1=alpha01,delta1=delta01,alpha2=alpha0
2,delta2=delta02, S3ad)):
> s1:=S1/S0:
s2:=S2/S0:
s3:=S3/S0:
> STOKES:=[s1,s2,s3]:
```

I.15. RETROMODULADOR REAL COMPLETO (SIMULACIONES DE γ O Φ_0 VARIABLE)

```
> restart:
> with(LinearAlgebra):
> with(plots):
> RR:=<<1|0|0|0>,<0|1|0|0>,<0|0|-1|0>,<0|0|0|-1>>:
> Rot:=proc(phi)
<<1|0|0|0>,<0|cos(2*phi)|-
sin(2*phi)|0>,<0|sin(2*phi)|cos(2*phi)|0>,<0|0|0|1>>;
end proc:
> Ret:=proc(deltaX)
<<1|0|0|0>,<0|1|0|0>,<0|0|cos(deltaX)|-
sin(deltaX)>,<0|0|sin(deltaX)|cos(deltaX)>>;
end proc:
> RotY:=proc(phi)
<<cos(phi),0,-sin(phi)>|<0,1,0>|<sin(phi),0,cos(phi)>>
end proc:
> N:=<sin(beta)*cos(phi),sin(beta)*sin(phi),cos(beta)>:
> K:=<sin(gamma1),0,cos(gamma1)>:
> theta:=arccos(N[1]*K[1]+N[3]*K[3]):
>neff:=simplify(sqrt(1/(sin(theta)^2/ne^2+cos(theta)^2/no^2
))):
Dn:=neff-no:
> Nrot:=RotY(-gamma1).N:
> delta:=subs(phi=phi1+phi0,2*Pi*Dn*L/lambda/cos(gamma1)):
> alpha:=subs(phi=phi1+phi0,arctan(-Nrot[2]/Nrot[1])):
>assume(Fx,RealRange(0.5,1),alpha1,RealRange(0,Pi),alpha2,R
ealRange(0,Pi),delta1,RealRange(0,4*Pi),delta2,RealRange(0,
4*Pi)):
> Jlas:=<1,0,0,1>:
> Mtot:=Rot(-alpha1).Ret(delta1).Rot(alpha1).Rot(-
alpha2).Ret(delta2).Rot(alpha2).RR.Rot(alpha2).Ret(delta2).
Rot(-alpha2).Rot(alpha1).Ret(delta1).Rot(-alpha1):
>Mtot2:=<<collect(combine(simplify(Mtot[1,1]),trig),exp)|co
llect(combine(simplify(Mtot[1,2]),trig),exp)|collect(combin
```

```
e(simplify(Mtot[1,3]),trig),exp)|collect(combine(simplify(M
tot[1,4]),trig),exp)>,
<collect(combine(simplify(Mtot[2,1]),trig),exp)|collect(com
bine(simplify(Mtot[2,2]),trig),exp)|collect(combine(simplif
y(Mtot[2,3]),trig),exp)|collect(combine(simplify(Mtot[2,4])
,trig),exp)>,
<collect(combine(simplify(Mtot[3,1]),trig),exp)|collect(com
bine(simplify(Mtot[3,2]),trig),exp)|collect(combine(simplif
y(Mtot[3,3]),trig),exp)|collect(combine(simplify(Mtot[3,4])
,trig),exp)>,
<collect(combine(simplify(Mtot[4,1]),trig),exp)|collect(com
bine(simplify(Mtot[4,2]),trig),exp)|collect(combine(simplif
y(Mtot[4,3]),trig),exp)|collect(combine(simplify(Mtot[4,4])
,trig),exp)>>:
> Jout:=Mtot2.Jlas:
> S0ad:=Jout[1]:
S1ad:=Jout[2]:
S2ad:=Jout[3]:
S3ad:=Jout[4]:
> phi01:=(7.672*V-1.871)/180*Pi:
beta1:=(1.498*V^2-0.018*V+49.86)/180*Pi:
> no01:=1.5:
ne01:=1.64:
lambda01:=632:
L01:=1500:
> alpha01:=subs(phi1=phi01,       beta=beta1,V=V1, alpha):
alpha02:=subs(phi1=phi01+phi00, beta=beta1,V=V2, alpha):
> delta01:=evalf(expand(subs(phi1=phi01,
beta=beta1,V=V1,ne=ne01,no=no01,lambda=lambda01,L=L01,
delta))):
delta02:=evalf(expand(subs(phi1=phi01+phi00,
beta=beta1,V=V2,ne=ne01,no=no01,lambda=lambda01,L=L01,
delta))):
>S0:=subs(alpha1=alpha01,delta1=delta01,alpha2=alpha02,delt
a2=delta02,subs(alpha1=alpha01,delta1=delta01,alpha2=alpha0
2,delta2=delta02, S0ad)):
>S1:=subs(alpha1=alpha01,delta1=delta01,alpha2=alpha02,delt
a2=delta02,subs(alpha1=alpha01,delta1=delta01,alpha2=alpha0
2,delta2=delta02, S1ad)):
>S2:=subs(alpha1=alpha01,delta1=delta01,alpha2=alpha02,delt
a2=delta02,subs(alpha1=alpha01,delta1=delta01,alpha2=alpha0
2,delta2=delta02, S2ad)):
>S3:=subs(alpha1=alpha01,delta1=delta01,alpha2=alpha02,delt
a2=delta02,subs(alpha1=alpha01,delta1=delta01,alpha2=alpha0
2,delta2=delta02, S3ad)):
> s1:=S1/S0:
s2:=S2/S0:
s3:=S3/S0:
> STOKES:=[s1,s2,s3]:
```

```
>sph:=plot3d([0.98*cos(a)*cos(b),0.98*sin(a)*cos(b),0.98*si
n(b)],a=0..Pi,b=0..2*Pi,thickness=3,style=wireframe,scaling
=constrained):
> Luz:=evalf(subs(gamma1=Pi/6,phi00=0,phi0=2*P,STOKES)):
> plots[display](plot3d(Luz,V1=-5..5,V2=-
5..5),sph,plot3d(Luz,V1=-5..-5.1,V2=-5..-
5.1,grid=[11,11],symbol=circle,style=point,symbolsize=30,co
lor=red), plot3d(Luz,V1=5..5.1,V2=-5..-
5.1,grid=[11,11],symbol=circle,style=point,symbolsize=30,co
lor=blue), plot3d(Luz,V1=-5..-
5.1,V2=5..5.1,grid=[11,11],symbol=circle,style=point,symbol
size=30,color=green),plot3d(Luz,V1=5..5.1,V2=5..5.1,grid=[1
1,11],symbol=circle,style=point,symbolsize=30,color=black),
scaling=constrained,labels=["s1","s2","s3"],scaling=constra
ined,axes=boxed,projection=0.9);
```

I.16. RETROMODULADOR REAL COMPLETO (SIMULACIONES DE γ VARIABLE PARA UN Φ_0 DETERMINADO)

```
> restart:
> with(LinearAlgebra):
> with(plots):
> RR:=<<1|0|0|0>,<0|1|0|0>,<0|0|-1|0>,<0|0|0|-1>>:
> Rot:=proc(phi)
<<1|0|0|0>,<0|cos(2*phi)|-
sin(2*phi)|0>,<0|sin(2*phi)|cos(2*phi)|0>,<0|0|0|1>>;
end proc:
> Ret:=proc(deltaX)
<<1|0|0|0>,<0|1|0|0>,<0|0|cos(deltaX)|-
sin(deltaX)>,<0|0|sin(deltaX)|cos(deltaX)>>;
end proc:
> RotY:=proc(phi)
<<cos(phi),0,-sin(phi)>|<0,1,0>|<sin(phi),0,cos(phi)>>
end proc:
> N:=<sin(beta)*cos(phi),sin(beta)*sin(phi),cos(beta)>:
> K:=<sin(gamma1),0,cos(gamma1)>:
> theta:=arccos(N[1]*K[1]+N[3]*K[3]):
>neff:=simplify(sqrt(1/(sin(theta)^2/ne^2+cos(theta)^2/no^2
))):
Dn:=neff-no:
> Nrot:=RotY(-gamma1).N:
> delta:=subs(phi=phi1+phi0,2*Pi*Dn*L/lambda/cos(gamma1)):
> alpha:=subs(phi=phi1+phi0,arctan(-Nrot[2]/Nrot[1])):
>
assume(Fx,RealRange(0.5,1),alpha1,RealRange(0,Pi),alpha2,Re
alRange(0,Pi),delta1,RealRange(0,4*Pi),delta2,RealRange(0,4
*Pi)):
```

```
> Jlas:=<1,0,0,1>:
> Mtot:=Rot(-alpha1).Ret(delta1).Rot(alpha1).Rot(-
alpha2).Ret(delta2).Rot(alpha2).RR.Rot(alpha2).Ret(delta2).
Rot(-alpha2).Rot(alpha1).Ret(delta1).Rot(-alpha1):
>
Mtot2:=<<collect(combine(simplify(Mtot[1,1]),trig),exp)|col
lect(combine(simplify(Mtot[1,2]),trig),exp)|collect(combine
(simplify(Mtot[1,3]),trig),exp)|collect(combine(simplify(Mt
ot[1,4]),trig),exp)>,
<collect(combine(simplify(Mtot[2,1]),trig),exp)|collect(com
bine(simplify(Mtot[2,2]),trig),exp)|collect(combine(simplif
y(Mtot[2,3]),trig),exp)|collect(combine(simplify(Mtot[2,4])
,trig),exp)>,
<collect(combine(simplify(Mtot[3,1]),trig),exp)|collect(com
bine(simplify(Mtot[3,2]),trig),exp)|collect(combine(simplif
y(Mtot[3,3]),trig),exp)|collect(combine(simplify(Mtot[3,4])
,trig),exp)>,
<collect(combine(simplify(Mtot[4,1]),trig),exp)|collect(com
bine(simplify(Mtot[4,2]),trig),exp)|collect(combine(simplif
y(Mtot[4,3]),trig),exp)|collect(combine(simplify(Mtot[4,4])
,trig),exp)>>:
> Jout:=Mtot2.Jlas:
> S0ad:=Jout[1]:
S1ad:=Jout[2]:
S2ad:=Jout[3]:
S3ad:=Jout[4]:
> phi01:=(7.672*V-1.871)/180*Pi:
beta1:=(1.498*V^2-0.018*V+49.86)/180*Pi:
> no01:=1.5: ne01:=1.64: lambda01:=632: L01:=1500:
> alpha01:=subs(phi1=phi01,       beta=beta1,V=V1, alpha):
alpha02:=subs(phi1=phi01+phi00, beta=beta1,V=V2, alpha):
> delta01:=evalf(expand(subs(phi1=phi01,
beta=beta1,V=V1,ne=ne01,no=no01,lambda=lambda01,L=L01,
delta))):
delta02:=evalf(expand(subs(phi1=phi01+phi00,
beta=beta1,V=V2,ne=ne01,no=no01,lambda=lambda01,L=L01,
delta))):
>S0:=subs(alpha1=alpha01,delta1=delta01,alpha2=alpha02,delt
a2=delta02,subs(alpha1=alpha01,delta1=delta01,alpha2=alpha0
2,delta2=delta02, S0ad)):
>S1:=subs(alpha1=alpha01,delta1=delta01,alpha2=alpha02,delt
a2=delta02,subs(alpha1=alpha01,delta1=delta01,alpha2=alpha0
2,delta2=delta02, S1ad)):
>S2:=subs(alpha1=alpha01,delta1=delta01,alpha2=alpha02,delt
a2=delta02,subs(alpha1=alpha01,delta1=delta01,alpha2=alpha0
2,delta2=delta02, S2ad)):
>S3:=subs(alpha1=alpha01,delta1=delta01,alpha2=alpha02,delt
a2=delta02,subs(alpha1=alpha01,delta1=delta01,alpha2=alpha0
2,delta2=delta02, S3ad)):
> s1:=S1/S0:
```

```
s2:=S2/S0:
s3:=S3/S0:
> STOKES:=[s1,s2,s3]:
>sph:=plot3d([0.98*cos(a)*cos(b),0.98*sin(a)*cos(b),0.98*si
n(b)],a=0..Pi,b=0..2*Pi,thickness=3,style=wireframe,scaling
=constrained):
> phiALEAT:=0:
> Luz:=evalf(subs(phi00=Pi/6,phi0=phiALEAT,STOKES)):


> Luzorange:=evalf(subs(V1=-2.05,V2=-
3.05,phi00=Pi/6,phi0=phiALEAT,STOKES)):
Luzyellow:=evalf(subs(V1=-4.05,V2=-
3.05,phi00=Pi/6,phi0=phiALEAT,STOKES)):
Luzcoral:=evalf(subs(V1=-
2.05,V2=+3.05,phi00=Pi/6,phi0=phiALEAT,STOKES)):
Luzred:=evalf(subs(V1=-
3.65,V2=+1.85,phi00=Pi/6,phi0=phiALEAT,STOKES)):
Luzgreen:=evalf(subs(V1=-
0.7,V2=+2.35,phi00=Pi/6,phi0=phiALEAT,STOKES)):
Luzblue:=evalf(subs(V1=-2.05,V2=-
5.05,phi00=Pi/6,phi0=phiALEAT,STOKES)):
Luzblack:=evalf(subs(V1=-
2.05,V2=+5.05,phi00=Pi/6,phi0=phiALEAT,STOKES)):
Luzviolet:=evalf(subs(V1=+5.05,V2=+2.05,phi00=Pi/6,phi0=phi
ALEAT,STOKES)):


fondo:=plots[display](
  plot3d(Luzorange,gamma1=0..Pi/6,basura=1..2,color=orange,
thickness=2),
  plot3d(Luzyellow,gamma1=0..Pi/6,basura=1..2,color=yellow,
thickness=2),
  plot3d(Luzcoral,gamma1=0..Pi/6,basura=1..2,color=coral,
thickness=2),
  plot3d(Luzred,gamma1=0..Pi/6,basura=1..2,color=red,
thickness=2),
  plot3d(Luzgreen,gamma1=0..Pi/6,basura=1..2,color=green,
thickness=2),
  plot3d(Luzblue,gamma1=0..Pi/6,basura=1..2,color=blue,
thickness=2),
  plot3d(Luzblack,gamma1=0..Pi/6,basura=1..2,color=black,
thickness=2),
  plot3d(Luzviolet,gamma1=0..Pi/6,basura=1..2,color=violet,
thickness=2),
  sph,
scaling=constrained,style=hidden,labels=["s1","s2","s3"],ax
es=boxed):
```

```
> FO:=proc(t) plots[display](
  plot3d(subs(gamma1=t, Luz),V1=-2.00..-2.10, V2=-3.00..-
3.10, grid=[11,11],
symbol=circle,style=point,symbolsize=30,color=orange),
  plot3d(subs(gamma1=t, Luz),V1=-4.00..-4.10,   V2=-3.00..-
3.10, grid=[11,11],
symbol=circle,style=point,symbolsize=30,color=yellow),
  plot3d(subs(gamma1=t, Luz),V1=-2.00..-2.10,
V2=+3.00..+3.10, grid=[11,11],symbol=circle,style=point,
symbolsize=30,color=coral),
  plot3d(subs(gamma1=t, Luz),V1=-3.60..-3.70,
V2=+1.80..+1.90, grid=[11,11],symbol=circle,style=point,
symbolsize=30,color=red),
  plot3d(subs(gamma1=t, Luz),V1=-0.65..-0.75,
V2=+2.30..+2.40, grid=[11,11],symbol=circle,style=point,
symbolsize=30,color=green),
  plot3d(subs(gamma1=t, Luz),V1=-2.00..-2.10,   V2=-5.00..-
5.10, grid=[11,11],
symbol=circle,style=point,symbolsize=30,color=blue),
  plot3d(subs(gamma1=t, Luz),V1=-2.00..-2.10,
V2=+5.00..+5.10, grid=[11,11],symbol=circle,style=point,
symbolsize=30,color=black),
  plot3d(subs(gamma1=t, Luz),V1=+5.00..+5.10,
V2=+2.00..+2.10, grid=[11,11],symbol=circle,style=point,
symbolsize=30,color=violet)
                              ); end proc:
>
animate(FO,[gamma1],gamma1=0..0.52,background=fondo,frames=
25);
```

I.17. RETROMODULADOR REAL COMPLETO (SIMULACIONES DE γ Y Φ_0 VARIABLE)

```
> restart:
> with(LinearAlgebra):
> with(plots):
> RR:=<<1|0|0|0>,<0|1|0|0>,<0|0|-1|0>,<0|0|0|-1>>:
> Rot:=proc(phi)
<<1|0|0|0>,<0|cos(2*phi)|-
sin(2*phi)|0>,<0|sin(2*phi)|cos(2*phi)|0>,<0|0|0|1>>;
end proc:
> Ret:=proc(deltaX)
<<1|0|0|0>,<0|1|0|0>,<0|0|cos(deltaX)|-
sin(deltaX)>,<0|0|sin(deltaX)|cos(deltaX)>>;
end proc:
> RotY:=proc(phi)
<<cos(phi),0,-sin(phi)>|<0,1,0>|<sin(phi),0,cos(phi)>>
end proc:
```

```
> N:=<sin(beta)*cos(phi),sin(beta)*sin(phi),cos(beta)>:
> K:=<sin(gamma1),0,cos(gamma1)>:
> theta:=arccos(N[1]*K[1]+N[3]*K[3]):
>neff:=simplify(sqrt(1/(sin(theta)^2/ne^2+cos(theta)^2/no^2
))):
Dn:=neff-no:
> Nrot:=RotY(-gamma1).N:
> delta:=subs(phi=phi1+phi0,2*Pi*Dn*L/lambda/cos(gamma1)):
> alpha:=subs(phi=phi1+phi0,arctan(-Nrot[2]/Nrot[1])):
>assume(Fx,RealRange(0.5,1),alpha1,RealRange(0,Pi),alpha2,R
ealRange(0,Pi),delta1,RealRange(0,4*Pi),delta2,RealRange(0,
4*Pi)):
> Jlas:=<1,0,0,1>:
> Mtot:=Rot(-alpha1).Ret(delta1).Rot(alpha1).Rot(-
alpha2).Ret(delta2).Rot(alpha2).RR.Rot(alpha2).Ret(delta2).
Rot(-alpha2).Rot(alpha1).Ret(delta1).Rot(-alpha1):
>Mtot2:=<<collect(combine(simplify(Mtot[1,1]),trig),exp)|co
llect(combine(simplify(Mtot[1,2]),trig),exp)|collect(combin
e(simplify(Mtot[1,3]),trig),exp)|collect(combine(simplify(M
tot[1,4]),trig),exp)>,
<collect(combine(simplify(Mtot[2,1]),trig),exp)|collect(com
bine(simplify(Mtot[2,2]),trig),exp)|collect(combine(simplif
y(Mtot[2,3]),trig),exp)|collect(combine(simplify(Mtot[2,4])
,trig),exp)>,
<collect(combine(simplify(Mtot[3,1]),trig),exp)|collect(com
bine(simplify(Mtot[3,2]),trig),exp)|collect(combine(simplif
y(Mtot[3,3]),trig),exp)|collect(combine(simplify(Mtot[3,4])
,trig),exp)>,
<collect(combine(simplify(Mtot[4,1]),trig),exp)|collect(com
bine(simplify(Mtot[4,2]),trig),exp)|collect(combine(simplif
y(Mtot[4,3]),trig),exp)|collect(combine(simplify(Mtot[4,4])
,trig),exp)>>:
> Jout:=Mtot2.Jlas:
> S0ad:=Jout[1]:
S1ad:=Jout[2]:
S2ad:=Jout[3]:
S3ad:=Jout[4]:
> phi01:=(7.672*V-1.871)/180*Pi:
beta1:=(1.498*V^2-0.018*V+49.86)/180*Pi:
> no01:=1.5:
ne01:=1.64:
lambda01:=632:
L01:=1500:
> alpha01:=subs(phi1=phi01,       beta=beta1,V=V1, alpha):
alpha02:=subs(phi1=phi01+phi00, beta=beta1,V=V2, alpha):
> delta01:=evalf(expand(subs(phi1=phi01,
beta=beta1,V=V1,ne=ne01,no=no01,lambda=lambda01,L=L01,
delta))):
```

```
delta02:=evalf(expand(subs(phi1=phi01+phi00,
beta=beta1,V=V2,ne=ne01,no=no01,lambda=lambda01,L=L01,
delta))):
>S0:=subs(alpha1=alpha01,delta1=delta01,alpha2=alpha02,delt
a2=delta02,subs(alpha1=alpha01,delta1=delta01,alpha2=alpha0
2,delta2=delta02, S0ad)):
>S1:=subs(alpha1=alpha01,delta1=delta01,alpha2=alpha02,delt
a2=delta02,subs(alpha1=alpha01,delta1=delta01,alpha2=alpha0
2,delta2=delta02, S1ad)):
>S2:=subs(alpha1=alpha01,delta1=delta01,alpha2=alpha02,delt
a2=delta02,subs(alpha1=alpha01,delta1=delta01,alpha2=alpha0
2,delta2=delta02, S2ad)):
>S3:=subs(alpha1=alpha01,delta1=delta01,alpha2=alpha02,delt
a2=delta02,subs(alpha1=alpha01,delta1=delta01,alpha2=alpha0
2,delta2=delta02, S3ad)):
> s1:=S1/S0:
s2:=S2/S0:
s3:=S3/S0:
> STOKES:=[s1,s2,s3]:
>
sph:=plot3d([0.98*cos(a)*cos(b),0.98*sin(a)*cos(b),0.98*sin
(b)],a=0..Pi,b=0..2*Pi,thickness=3,style=wireframe,scaling=
constrained):
>fondo:=plot3d([cos(a)*cos(b),sin(a)*cos(b),sin(b)],a=0..Pi
,b=0..2*Pi,labels=["s1","s2","s3"]):
> Luzorange:=evalf(subs(V1=-2.05,V2=-
3.05,phi00=Pi/6,STOKES)):
Luzyellow:=evalf(subs(V1=-4.05,V2=-
3.05,phi00=Pi/6,STOKES)):
Luzcoral:=evalf(subs(V1=-2.05,V2=+3.05,phi00=Pi/6,STOKES)):
Luzred:=evalf(subs(V1=-3.65,V2=+1.85,phi00=Pi/6,STOKES)):
Luzgreen:=evalf(subs(V1=-0.7,V2=+2.35,phi00=Pi/6,STOKES)):
Luzblue:=evalf(subs(V1=-2.05,V2=-5.05,phi00=Pi/6,STOKES)):
Luzblack:=evalf(subs(V1=-2.05,V2=+5.05,phi00=Pi/6,STOKES)):
Luzviolet:=evalf(subs(V1=+5.05,V2=+2.05,phi00=Pi/6,STOKES))
:
> FO:=proc(t) plots[display](

plot3d(subs(phi0=t,Luzorange),gamma1=0..Pi/6,basura=1..2,th
ickness=3,color=orange),

plot3d(subs(phi0=t,Luzyellow),gamma1=0..Pi/6,basura=1..2,th
ickness=3,color=yellow),

plot3d(subs(phi0=t,Luzcoral),gamma1=0..Pi/6,basura=1..2,thi
ckness=3,color=coral),

plot3d(subs(phi0=t,Luzred),gamma1=0..Pi/6,basura=1..2,thick
ness=3,color=red),
```

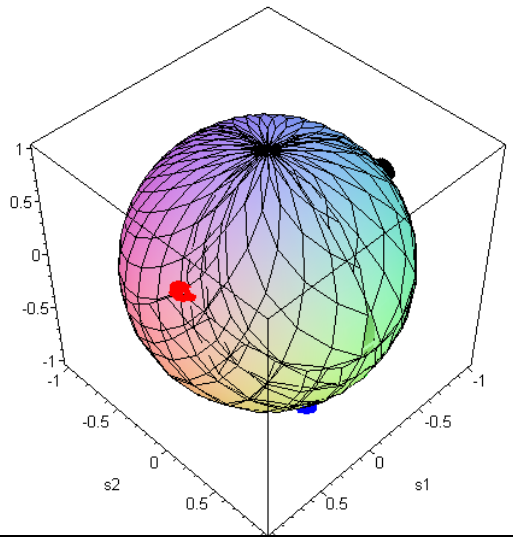
```
plot3d(subs(phi0=t,Luzgreen),gamma1=0..Pi/6,basura=1..2,thi
ckness=3,color=green),

plot3d(subs(phi0=t,Luzblue),gamma1=0..Pi/6,basura=1..2,thic
kness=3,color=blue),

plot3d(subs(phi0=t,Luzblack),gamma1=0..Pi/6,basura=1..2,thi
ckness=3,color=black),

plot3d(subs(phi0=t,Luzviolet),gamma1=0..Pi/6,basura=1..2,th
ickness=3,color=violet)
  ); end proc:
>
animate(FO,[phi0],phi0=0..2*Pi,background=fondo,frames=50);
```

Apéndice II: Resultados finales de las simulaciones

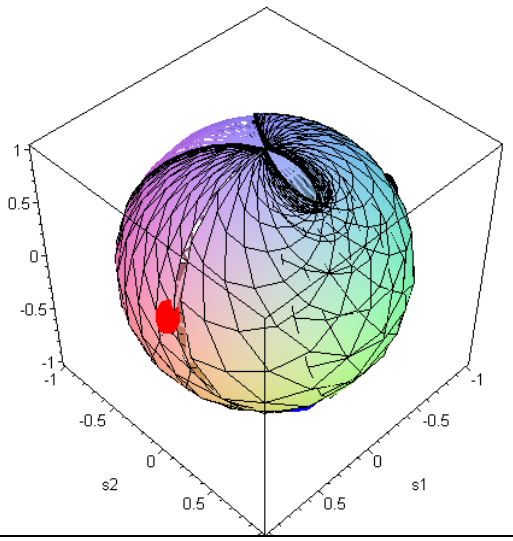
A continuación se muestran los resultados completos de las simulaciones finales del retromodulador discutidas en el apartado 4.4. En las simulaciones de los apéndices II.1, II.2, II.3 y II.4 se utiliza un rango de variaciones de γ con valores comprendidos entre 0º, haz perpendicular a la superficie terrestre, y 45º como caso peor de máxima inclinación. El valor de ϕ_0 permanece constante a 0º. En los apéndices II.5, II.6, II.7 y II.8 se muestra el resultado de ir variando ϕ_0 para distintos ángulos de alineamiento entre células. El valor de γ utilizado ha sido 30º, que es un valor típico de caso extremo. En los apéndices II.9, II.10, II.11 y II.12 los SOPs describen líneas en función del voltaje y se pueden ver sus variaciones sobre la superficie de la esfera de Poincaré con γ y ϕ_0. Por último, en el apéndice II.13 se muestra el comportamiento de las líneas de SOP variando según γ para diferentes valores de ϕ_0.

II.1. γ VARIABLE Y CÉLULAS ALINEADAS A 0º

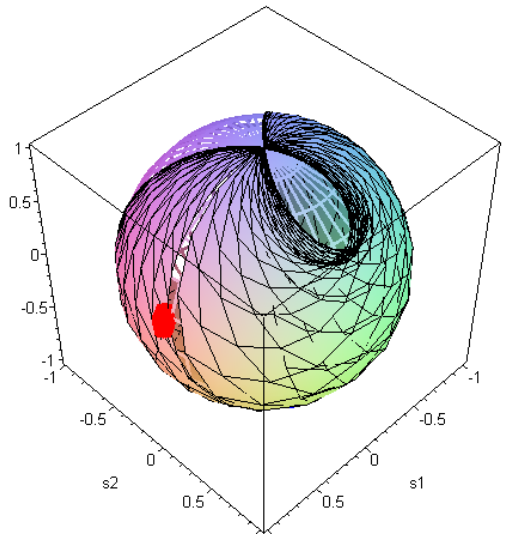
γ = 0



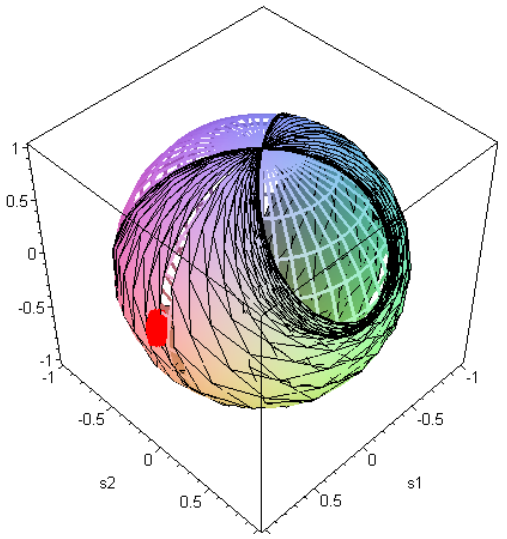
γ = π/12



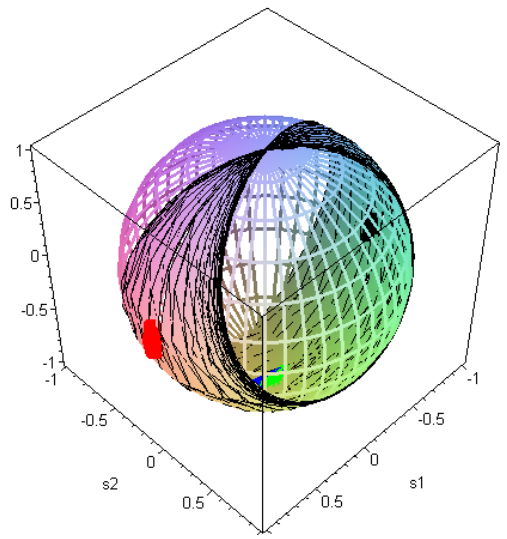
γ = π/10



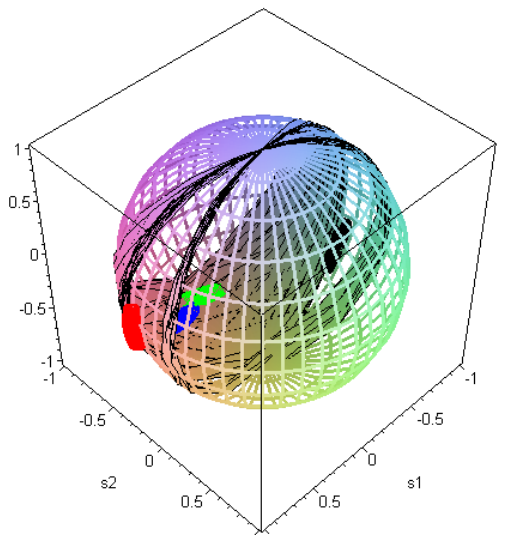
γ = π/8



γ = π/6

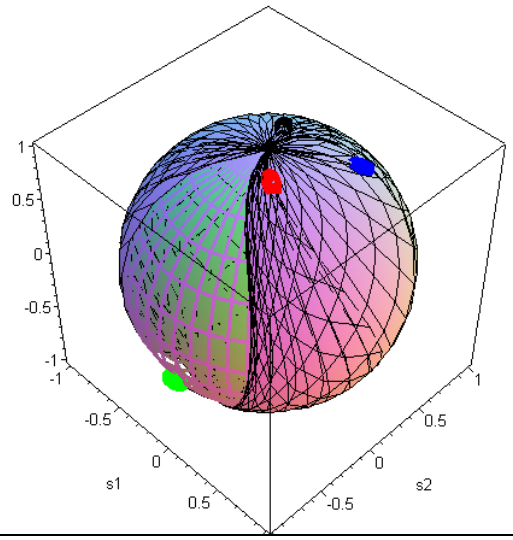


γ = π/4

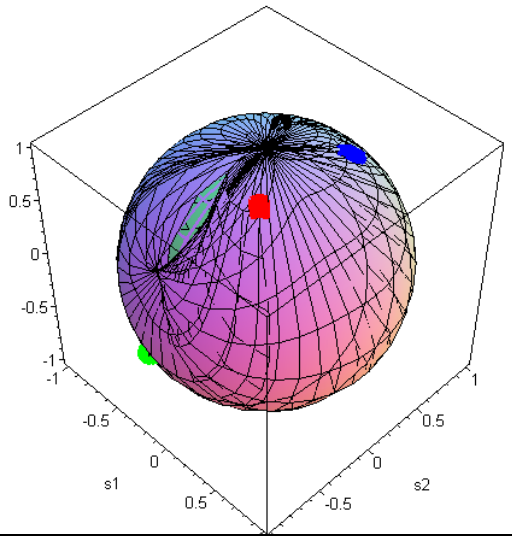


II.2. γ VARIABLE Y CÉLULAS ALINEADAS A 30º

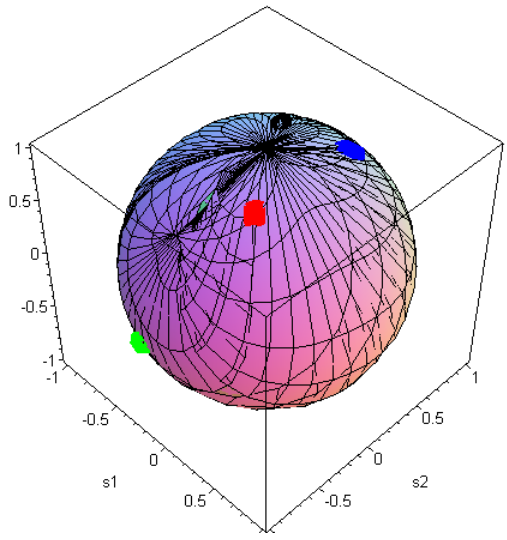
γ = 0



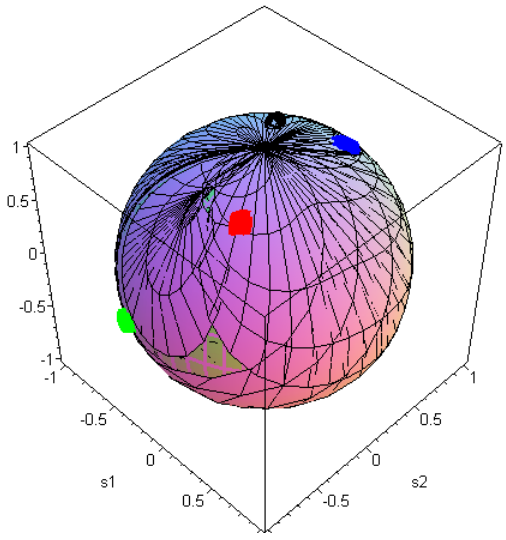
γ = π/12



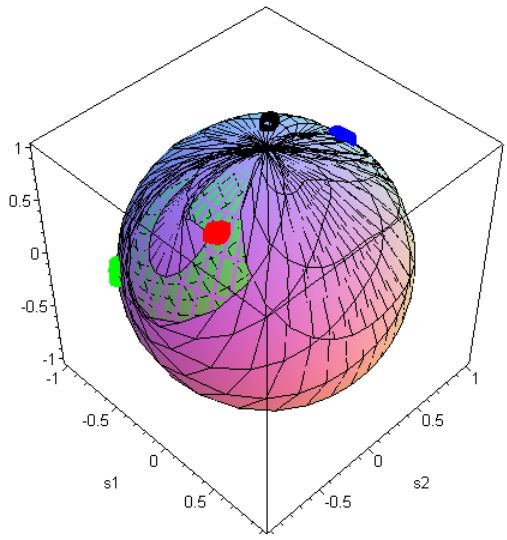
γ = π/10



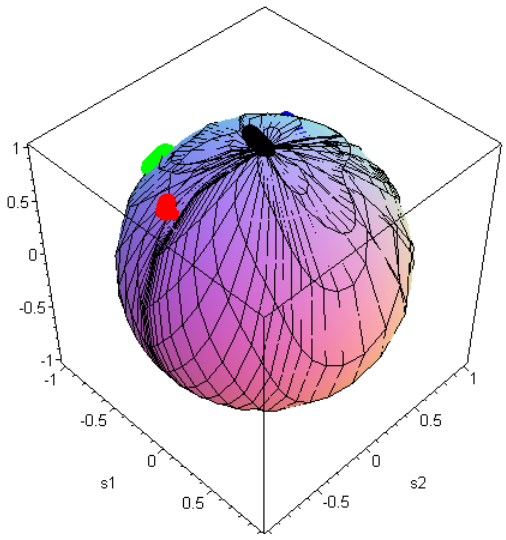
γ = π/8



γ = π/6

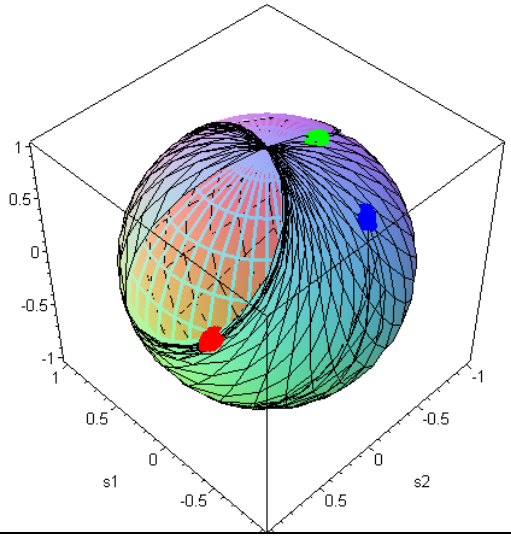


γ = π/4

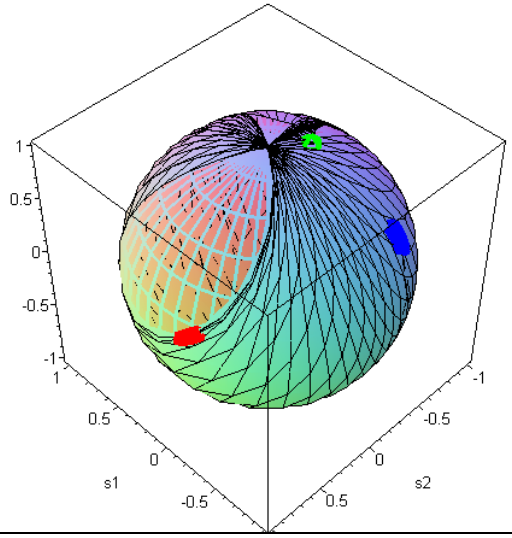


II.3. γ VARIABLE Y CÉLULAS ALINEADAS A 60º

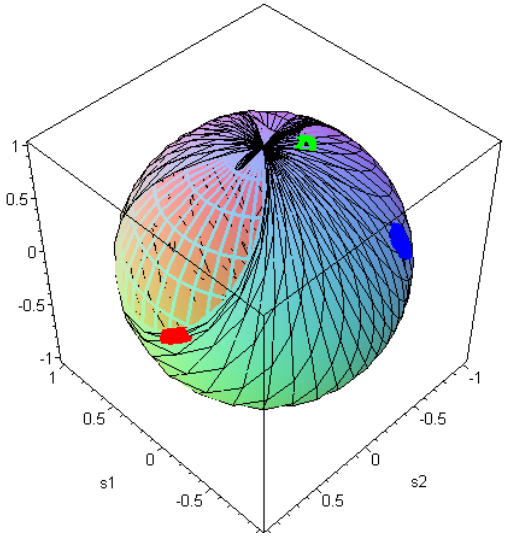
γ = 0



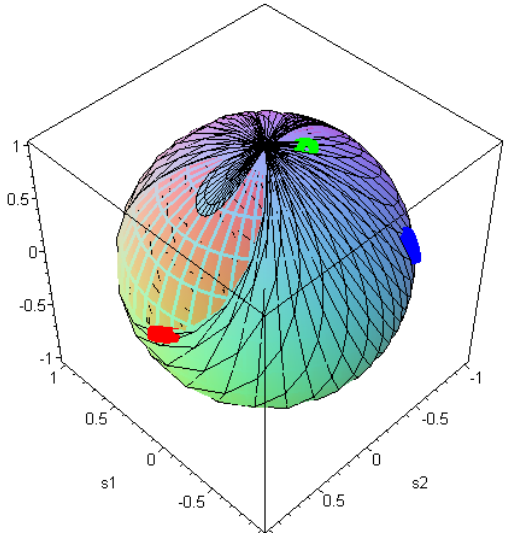
γ = π/12



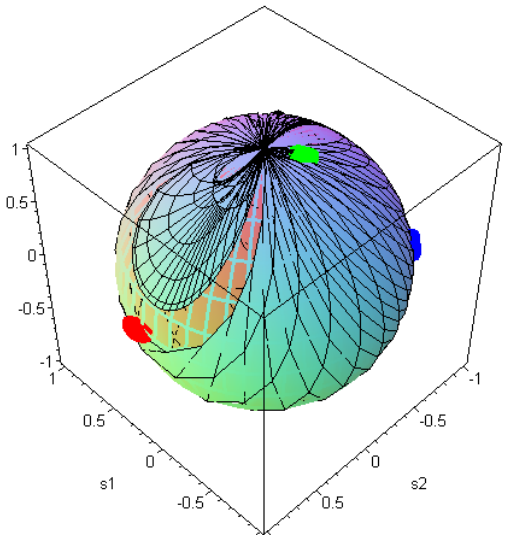
γ = π/10



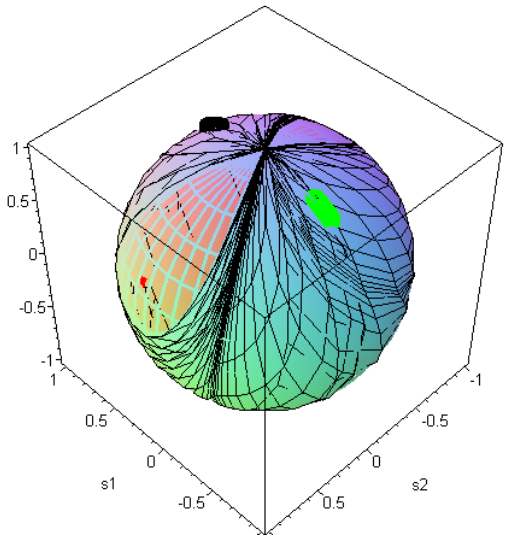
γ = π/8



γ = π/6

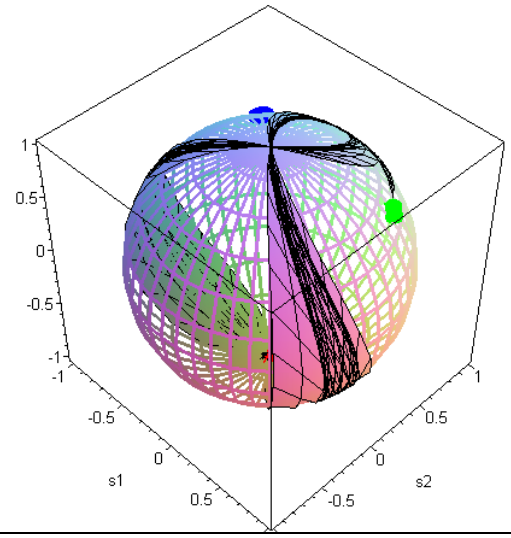


γ = π/4

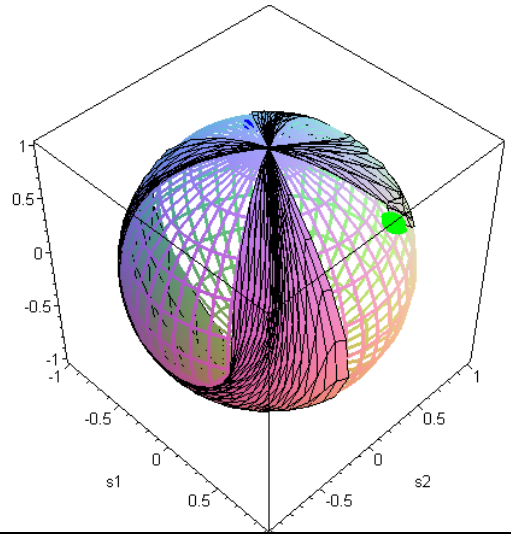


II.4. γ VARIABLE Y CÉLULAS ALINEADAS A 90º

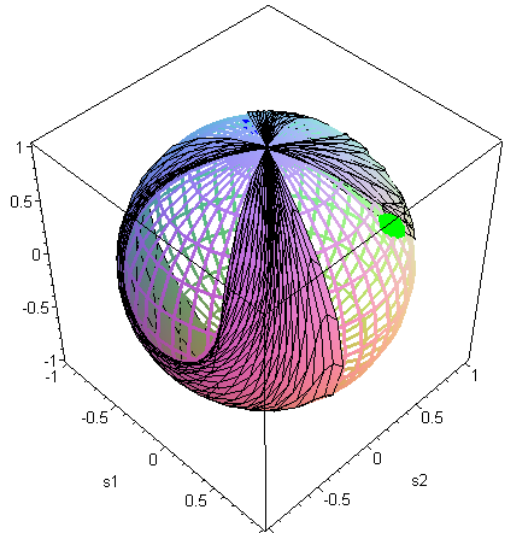
γ = 0



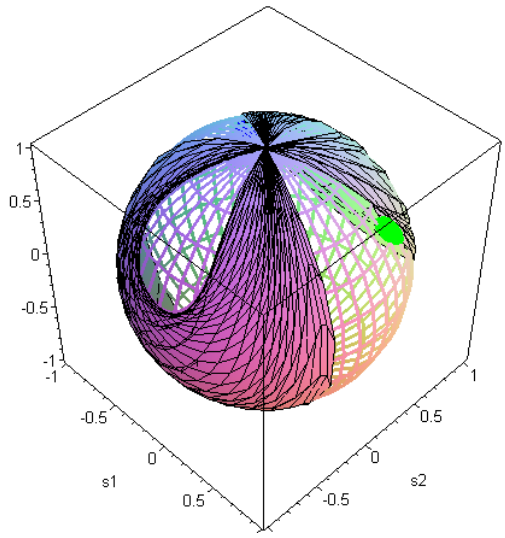
γ = π/12



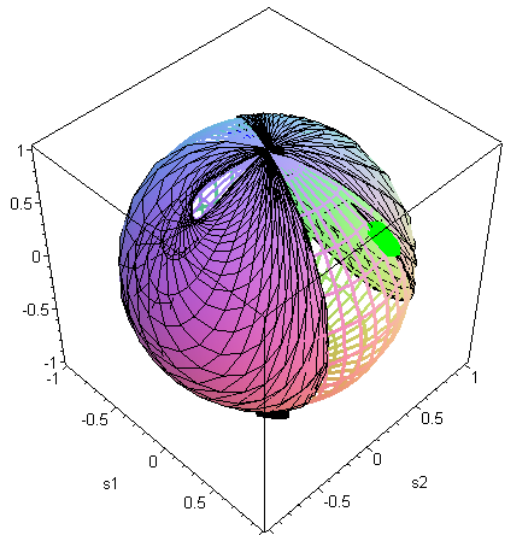
γ = π/10



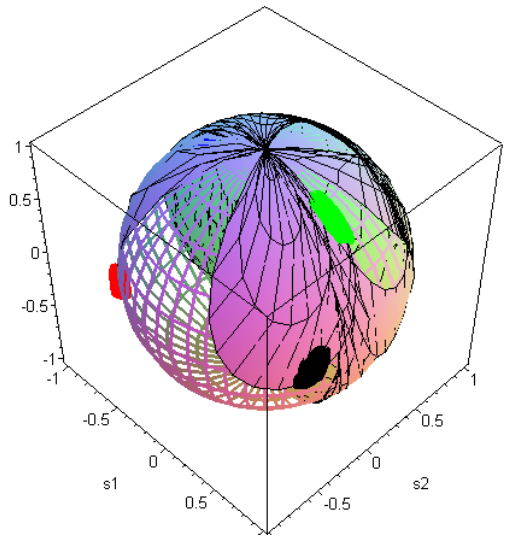
γ = π/8



γ = π/6

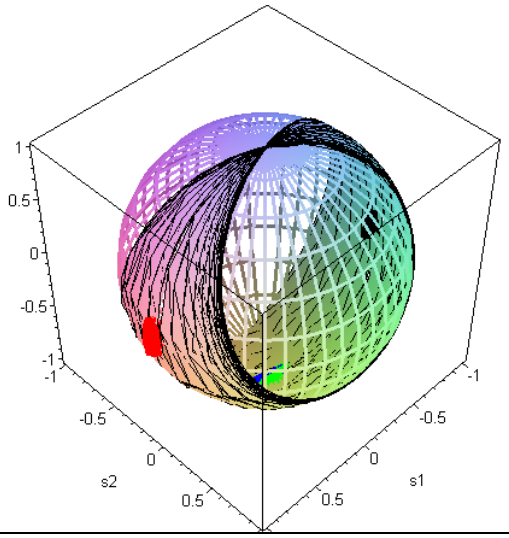


γ = π/4

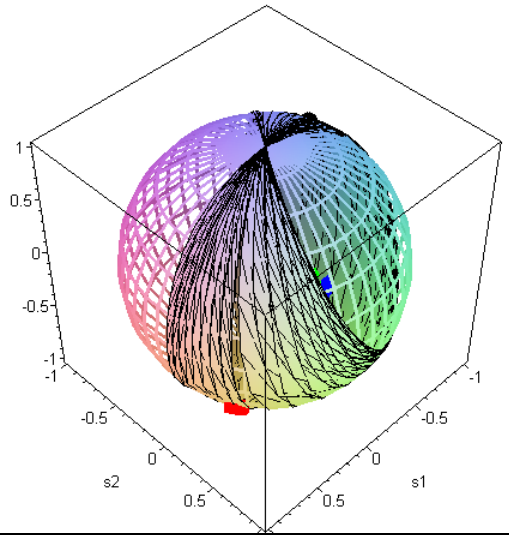


II.5. Φ_0 VARIABLE Y CÉLULAS ALINEADAS A 0º Y γ=30º

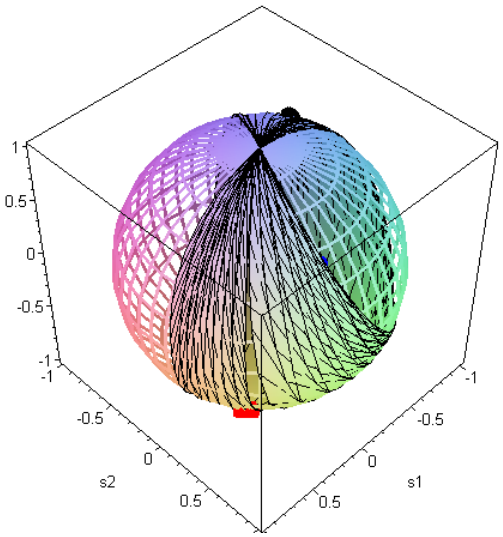
$\Phi_0 = 0$



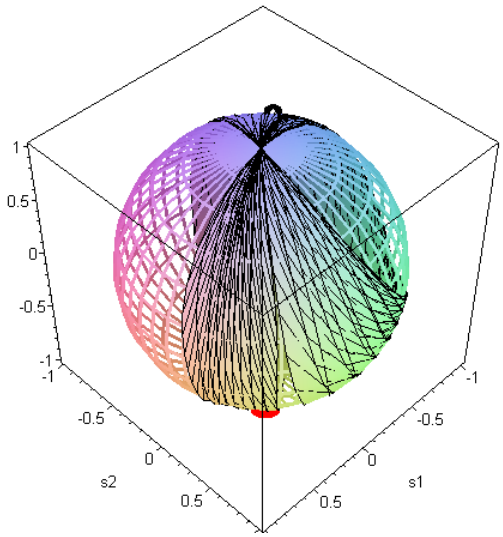
$\Phi_0 = \pi/12$



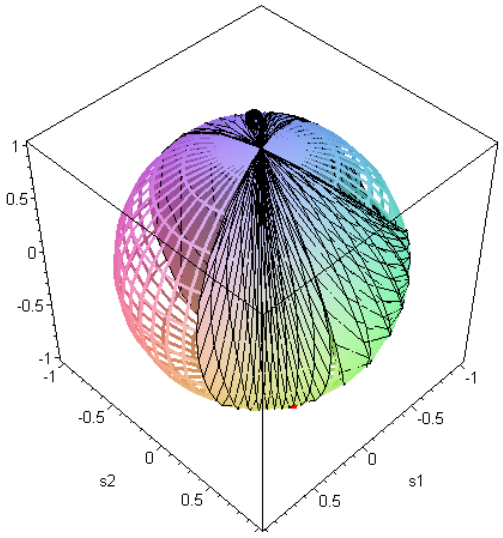
$\Phi_0 = \pi/10$



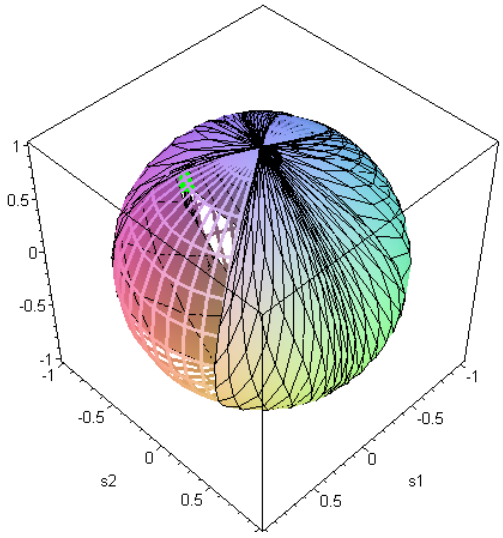
$\Phi_0 = \pi/8$



$\Phi_0 = \pi/6$

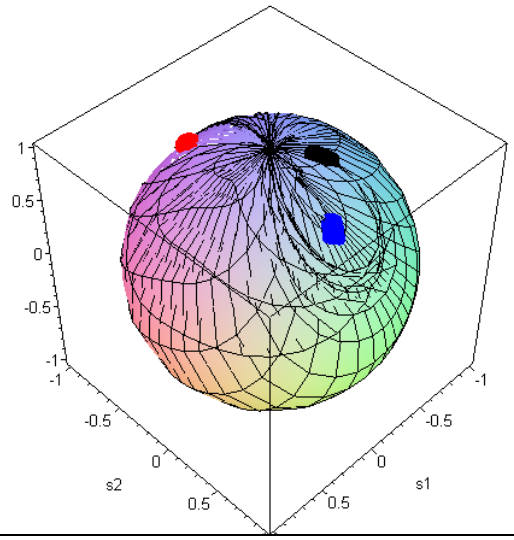


$\Phi_0 = \pi/4$

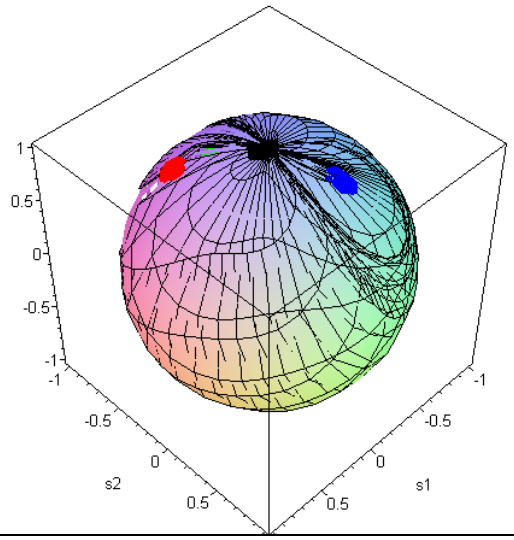


II.6. Φ_0 VARIABLE Y CÉLULAS ALINEADAS A 30º Y γ=30º

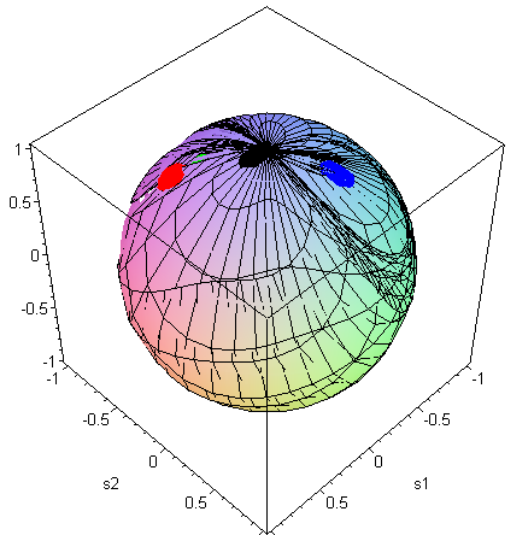
$\Phi_0 = 0$



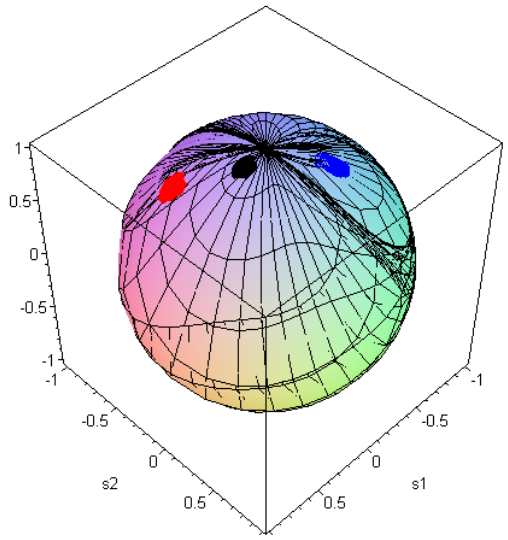
$\Phi_0 = \pi/12$



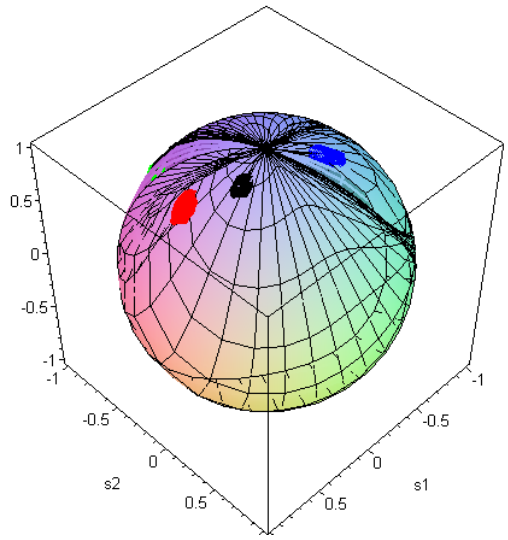
$\Phi_0 = \pi/10$



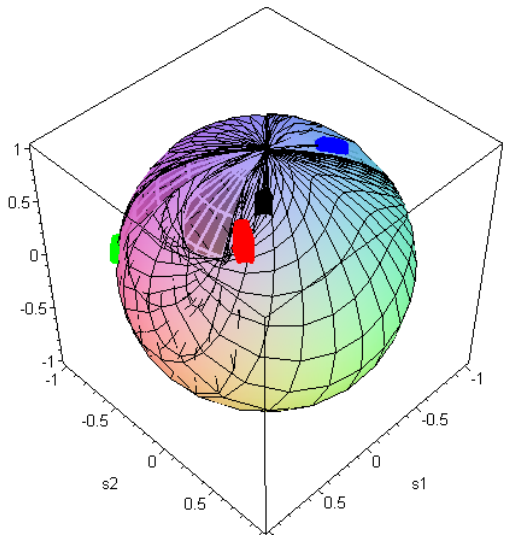
$\Phi_0 = \pi/8$



$\Phi_0 = \pi/6$

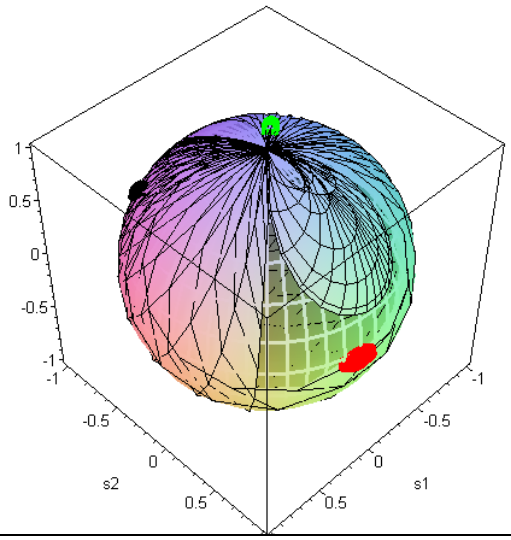


$\Phi_0 = \pi/4$

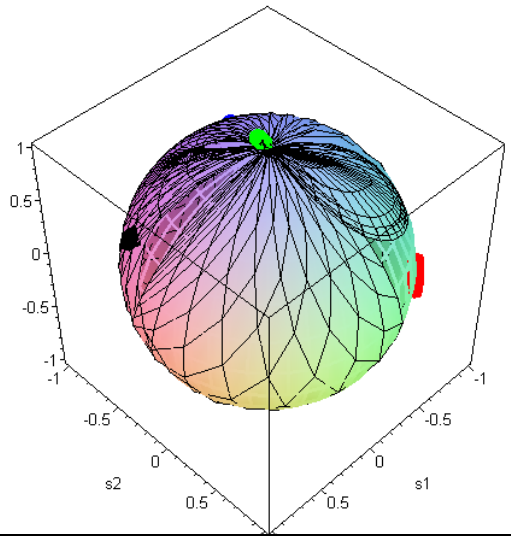


II.7. Φ_0 VARIABLE Y CÉLULAS ALINEADAS A 60º Y γ=30º

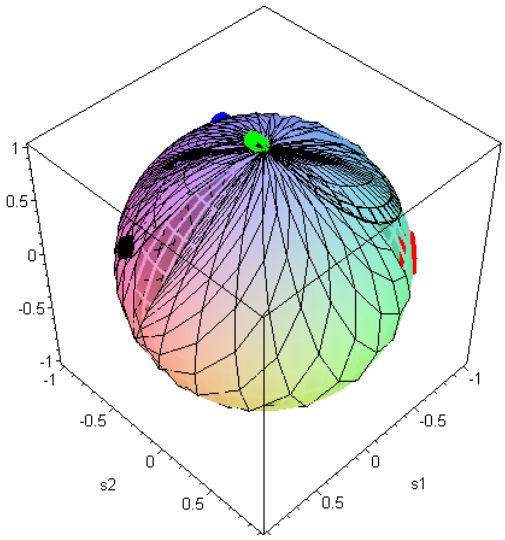
$\Phi_0 = 0$



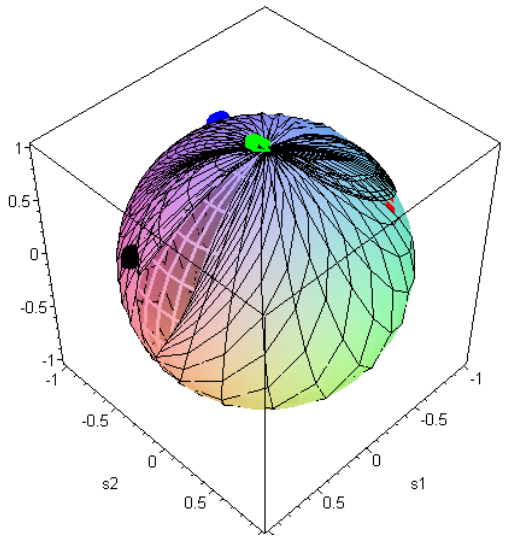
$\Phi_0 = \pi/12$



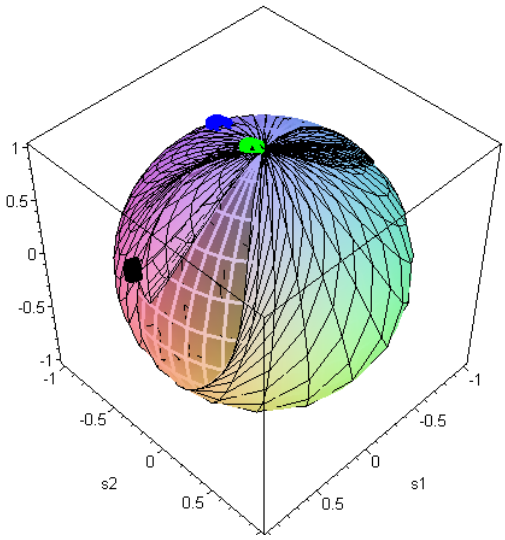
$\Phi_0 = \pi/10$



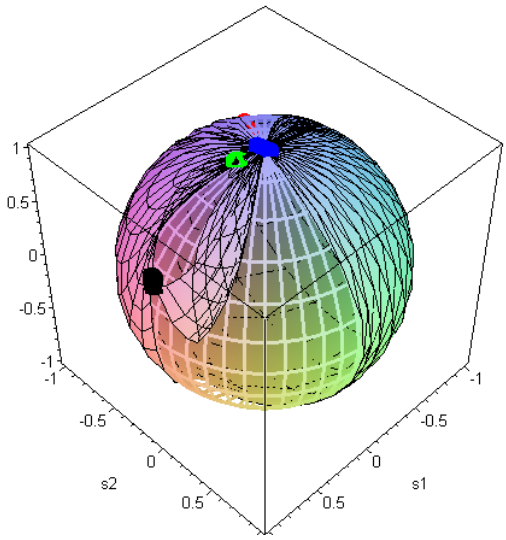
$\Phi_0 = \pi/8$



$\Phi_0 = \pi/6$

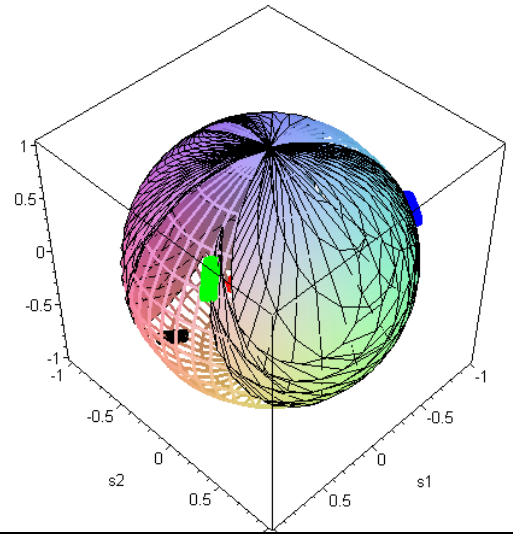


$\Phi_0 = \pi/4$

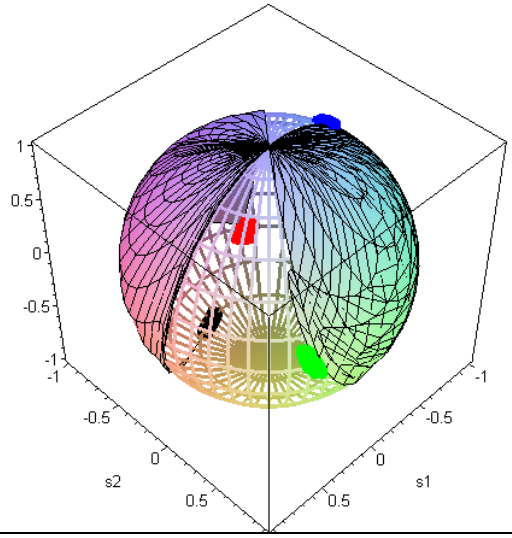


II.8. Φ_0 VARIABLE Y CÉLULAS ALINEADAS A 90º Y γ=30º

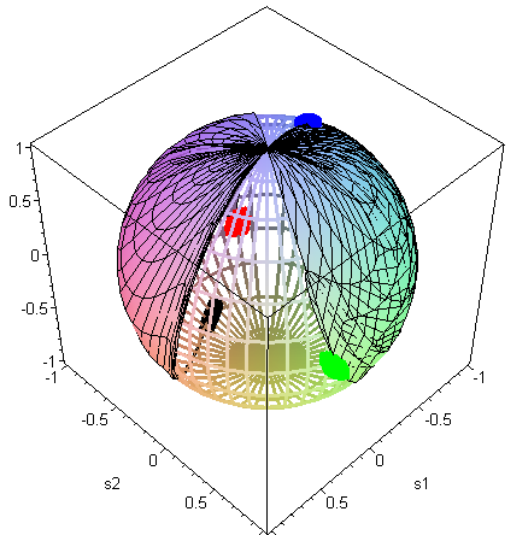
$\Phi_0 = 0$



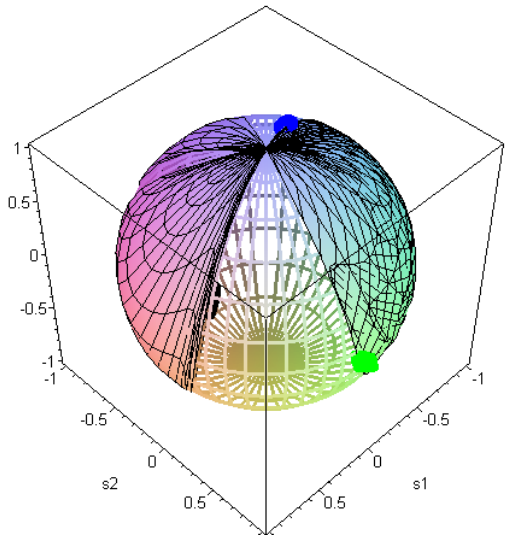
$\Phi_0 = \pi/12$



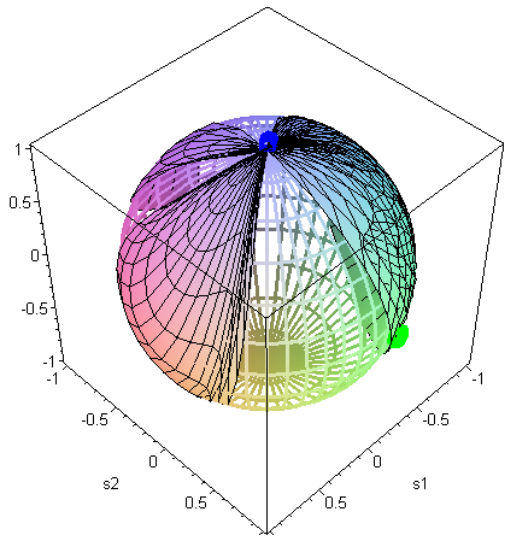
$\Phi_0 = \pi/10$



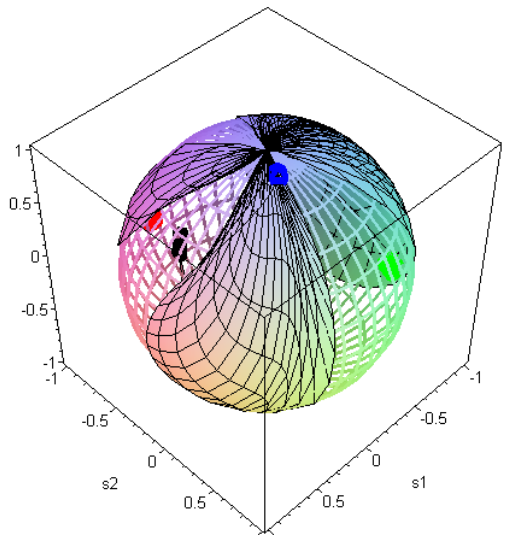
$\Phi_0 = \pi/8$



$\Phi_0 = \pi/6$

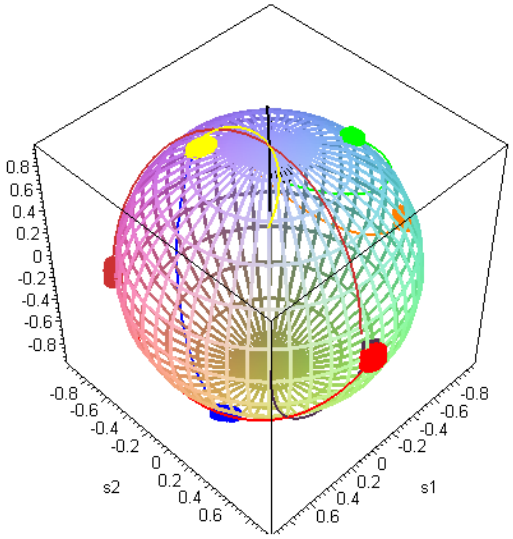


$\Phi_0 = \pi/4$

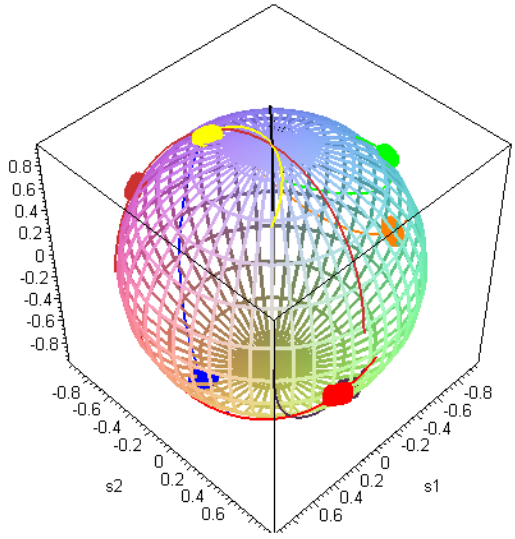


II.9. γ VARIABLE PARA Φ_0=0

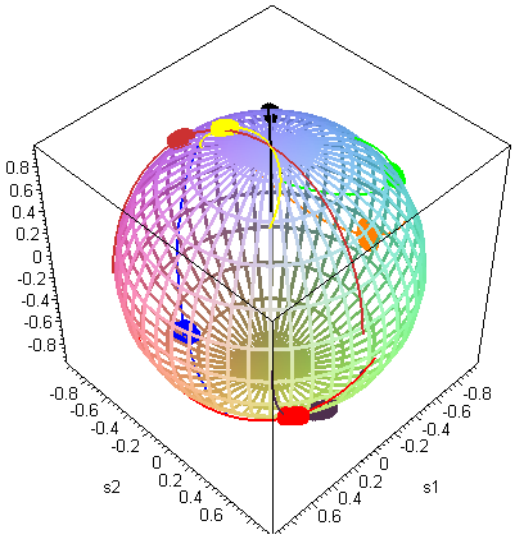
γ = 0



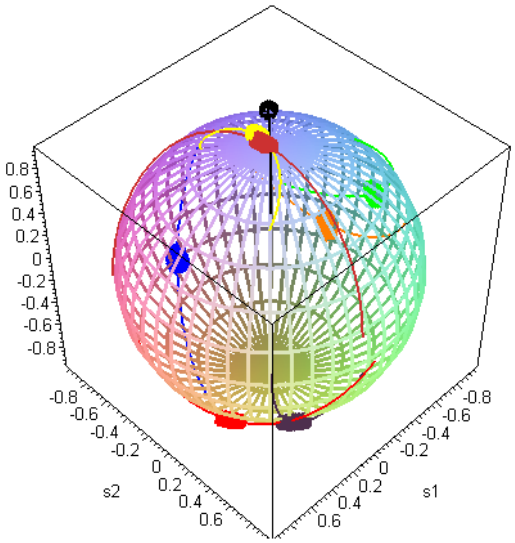
γ = 6º



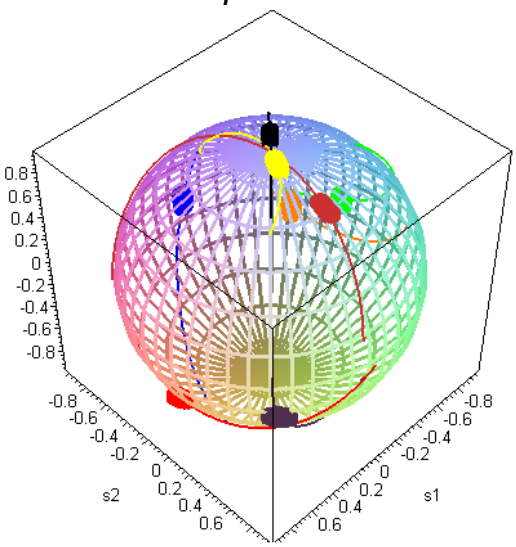
γ = 12º



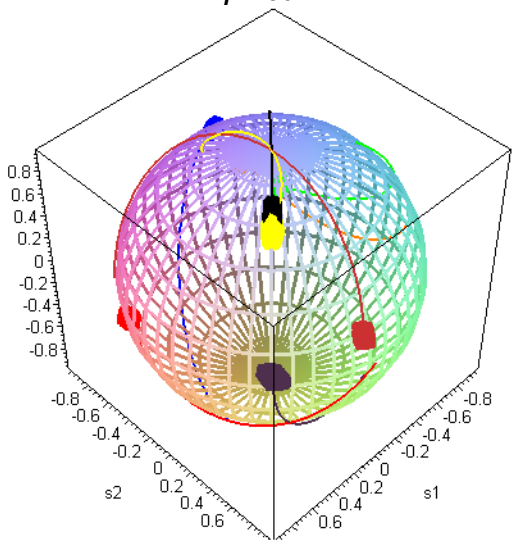
γ = 18º



γ = 24º

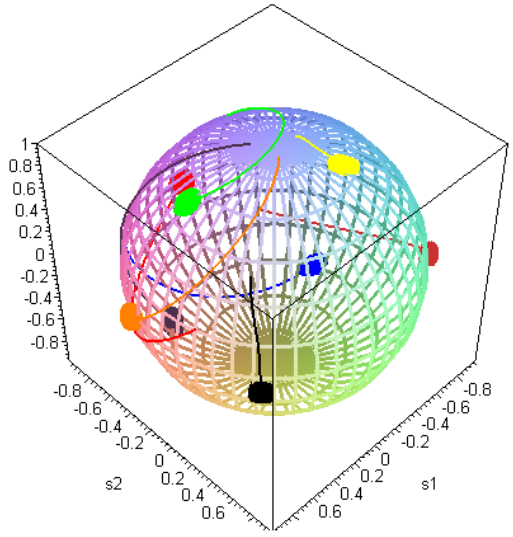


γ = 30º

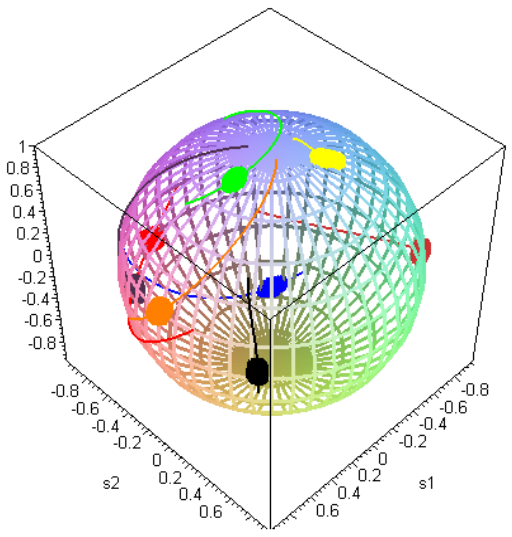


II.10. γ VARIABLE PARA $\Phi_0=\pi/2$

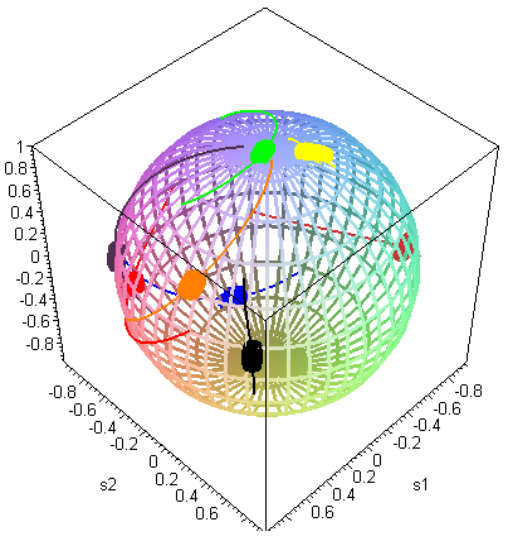
γ = 0



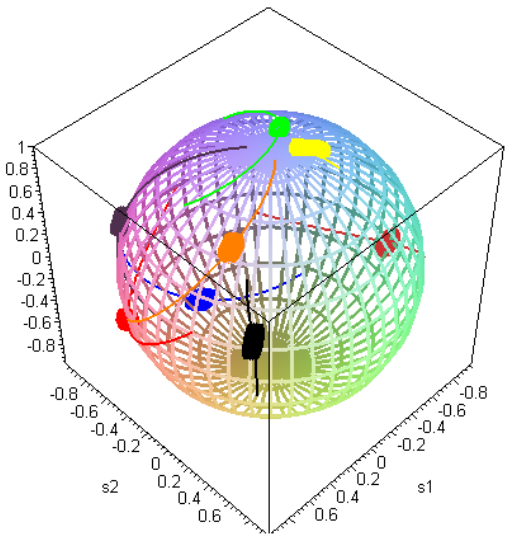
γ = 6º



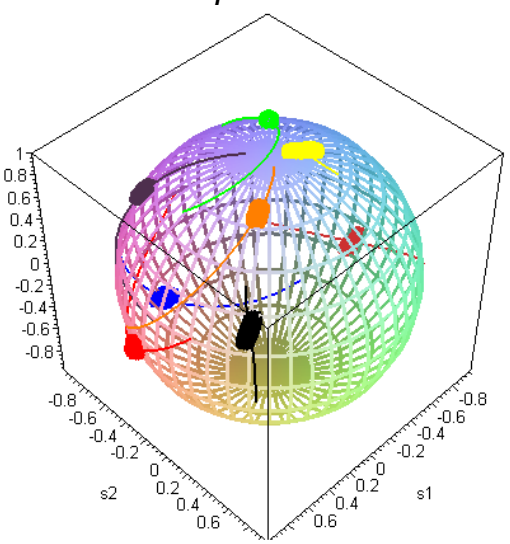
γ = 12º



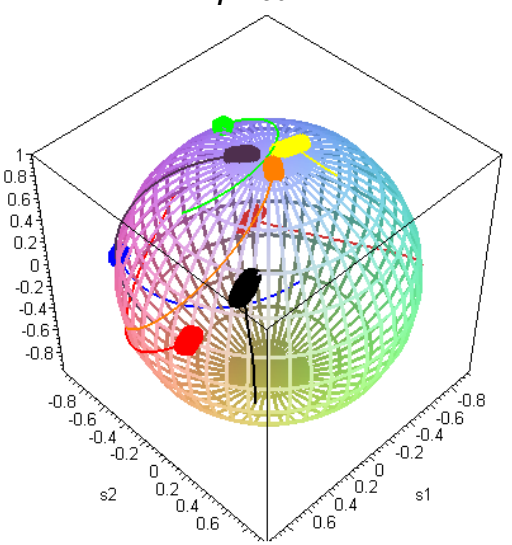
γ = 18º



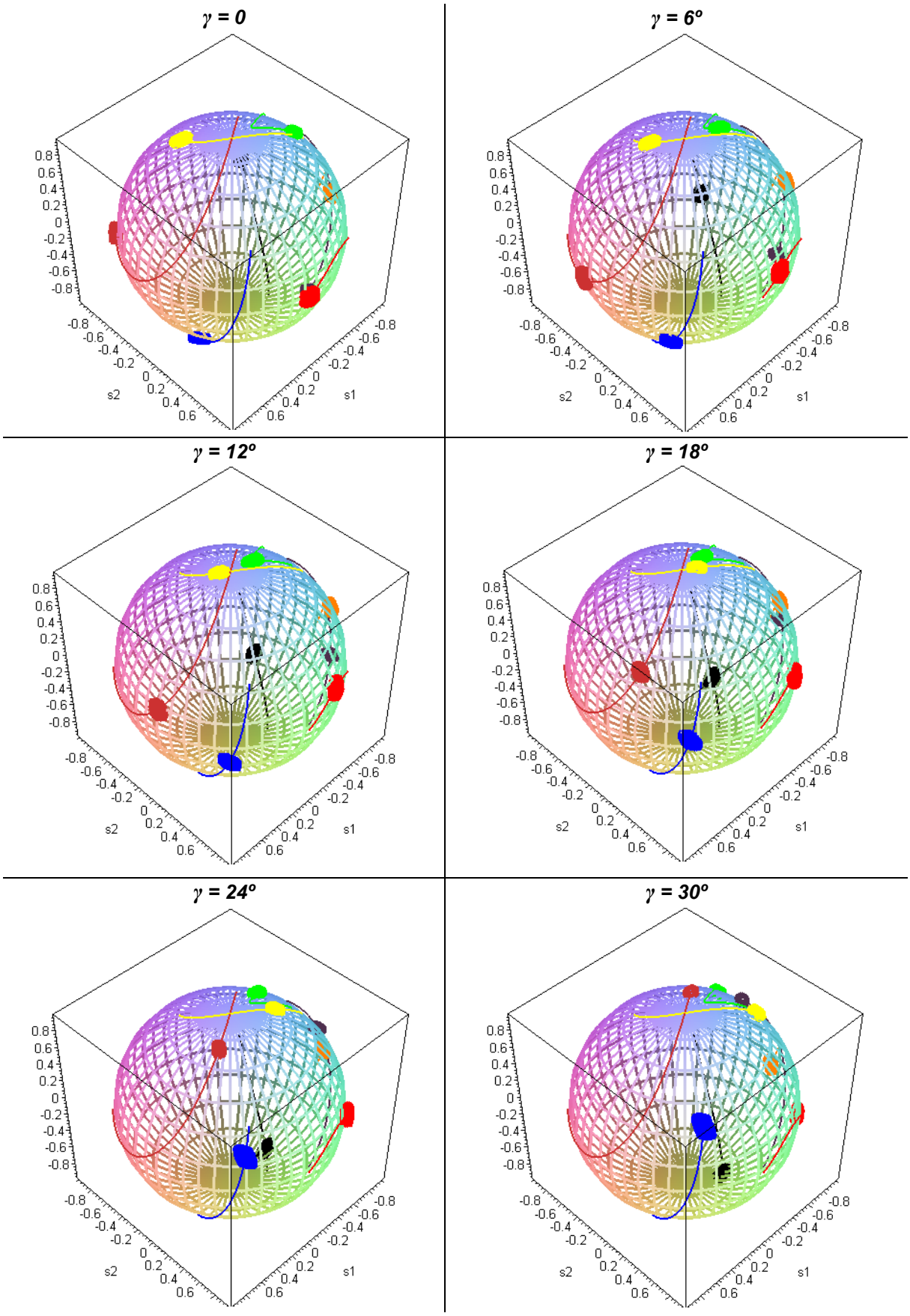
γ = 24º



γ = 30º

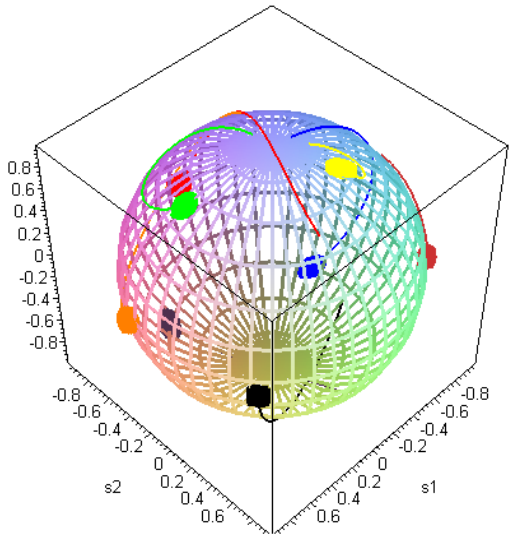


II.11. γ VARIABLE PARA $\Phi_0=\pi$

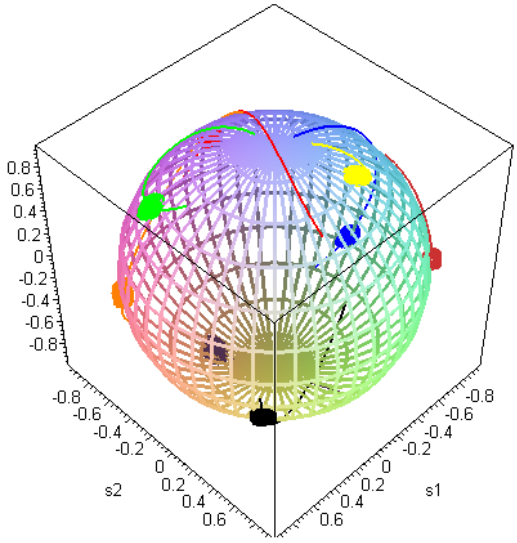


II.12. γ VARIABLE PARA $\Phi_0=3\pi/2$

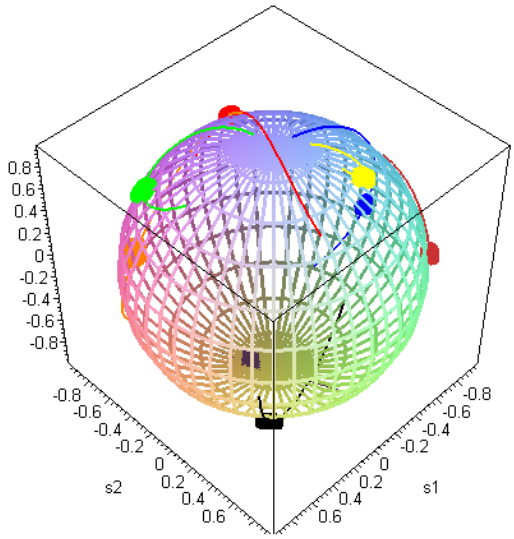
$\gamma = 0$



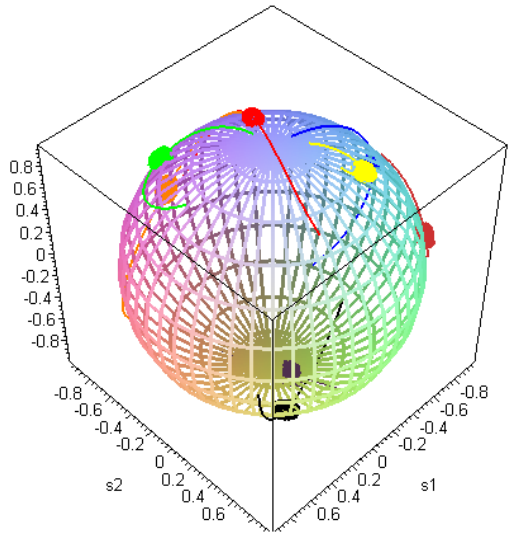
$\gamma = 6º$



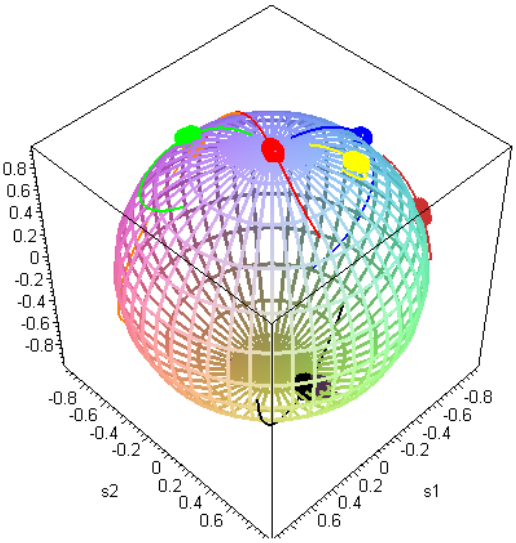
$\gamma = 12º$



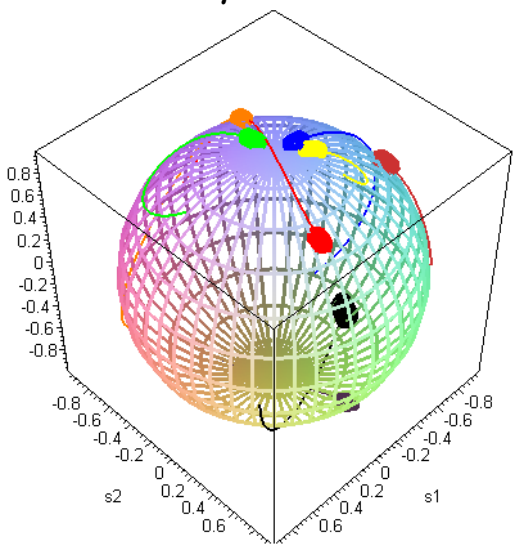
$\gamma = 18º$



$\gamma = 24º$

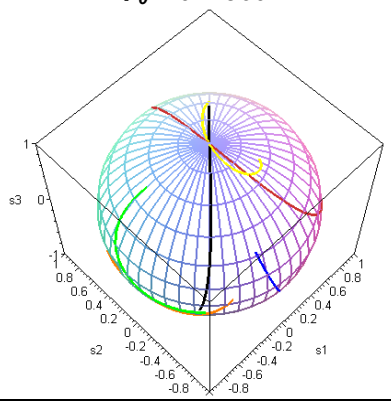


$\gamma = 30º$

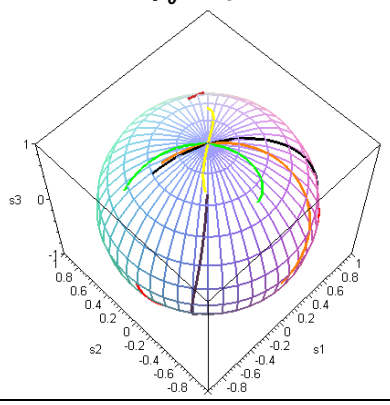


II.13. Φ_0 Y γ VARIABLES

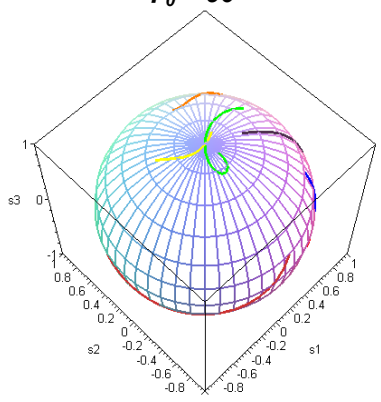
$\Phi_0 = 0 = 360º$



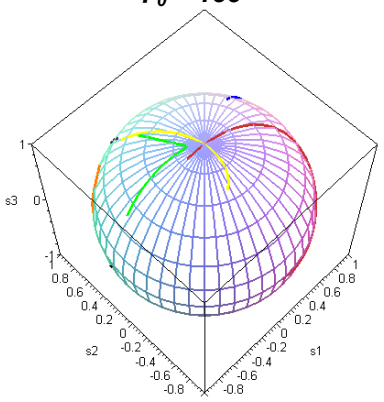
$\Phi_0 = 45º$



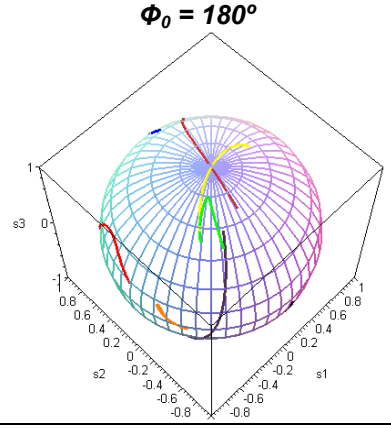
$\Phi_0 = 90º$



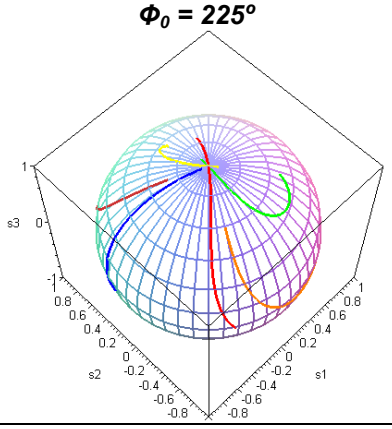
$\Phi_0 = 135º$



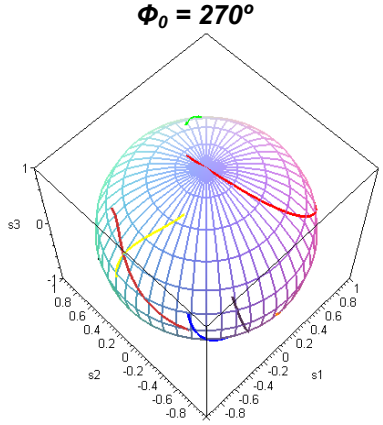
$\Phi_0 = 180º$



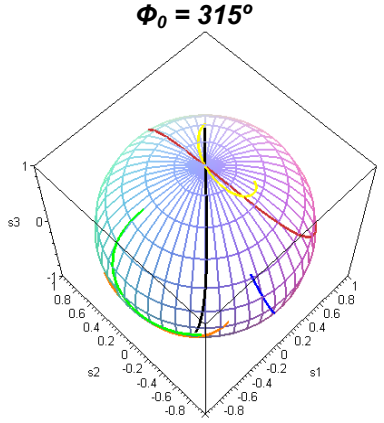
$\Phi_0 = 225º$



$\Phi_0 = 270º$



$\Phi_0 = 315º$



Bibliografía

[1] J. A. Rubio, *Comunicaciones Ópticas no guiadas. Proyectos en curso*. Mundo Electrónico, **309**, 42-44 (2000).

[2] H. Hemmati, *Deep Space Optical Communications*. John Wiley & Sons: Hoboken, New Jersey (2006).

[3] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge University Press: Cambridge (2005).

[4] P.K. Bondyopadhyay, *Sir J. C. Bose's Diode Detector Received Marconi's First Transatlantic Wireless Signal Of December 1901 (The "Italian Navy Coherer" Scandal Revisited)*. Proc. IEEE **86**(1), 259-285 (1998).

[5] Unión Internacional de Telecomunicaciones, *Manual de Comunicaciones por Satélite*. John Wiley & Sons: Nueva York (2002).

[6] J. A. Martín Pereda, *Prehistoria de las comunicaciones ópticas*. Apuntes de clase: ETSI Telecomunicación, UPM (2001).

[7] J.H. Franz y V.K. Jain, *Optical Communications: Components and Systems*. Alpha Science International: Londres (2000).

[8] G. J. Holzmann, *Data Communications, The First 2500 Years*. Proc. IFIP **2**, 271-278 (1994).

[9] S. Olivé, *Historia de la Telegrafía Óptica en España*. Mº de Transportes, Turismo y Comunicaciones: Madrid (1990).

[10] J. Capmany, F. J. Fraile-Peláez y Javier Martí, *Fundamentos de Comunicaciones Ópticas*. Síntesis: Madrid (2001).

[11] ESA's Multimedia Gallery, *ARTEMIS program*, http://www.esa.int/esa-mmg/mmg.pl?&keyword=ARTEMIS

[12] H. Hemmati, K. Wilson, M. K. Sue, L. J. Harcke, M. Wilhelm, C. C. Chen, J. Lesh, Y. Feria, D. Rascoe, F. Lansing y J. W. Layland, *Comparative Study of Optical and Radio-Frequency Communication System for a Deep-Space Mission*. NASA Technical Reports JPL TDA PR **42**, 1-33 (1996).

[13] L. J. Sjöqvist, E. J. Hällstig, J. Öhgren, L. Allard, D. Ågren, S. Junique, Q. Wang, B. Noharet, D. Engström, S. Hård, *A novel free-space retrocommunication link*, Proc. SPIE **5614**, 10-23 (2004).

[14] R. Koczor, *The Last Moon Experiment*, http://www.firstscience.com/site/articles/moon.asp

[15] *RIS: Retroreflector In Space Home Page*, http://www-lidar.nies.go.jp/RIS

[16] NASA, *The LAGEOS program*, http://science.hq.nasa.gov/missions/lageos.htm

[17] C. Jenkins, J. Gordon Brown, L. Li, W. Johnstone y D. Uttamchandani, *MEMS Retro-Phase-Modulator for Free-Space Coherent Optical Communications.* IEEE J. Sel. Topics Quant. Electron. **13**(2), 330-335 (2007).

[18] P. B. Chu, N. R. Lo, E. C. Berg y K. S. J. Pister, *Optical Communication using Micro Corner Cube Reflectors.* Proc. IEEE MEMS Workshop **10**, 330-355 (1997).

[19] G. C. Gilbreath, W. S. Rabinovich, R. Mahon, D. S. Katzer, K. Ikossi-Anastasiou, M. R. Corson, J. F. Kline, J. Resnick, H. C. Merk, y M. J. Vilcheck, *Modulating Retroreflector Architecture Using Multiple Quantum Wells for Free Space Optical Communications.* Proc. SPIE **3491**, 581-586 (1998).

[20] G. C. Gilbreath, W. S. Rabinovich, T. J. Meehan, M. J. Vilcheck, R. Mahon, R. Burris, M. Ferraro, I. Sokolsky, J. A. Vasquez, C. S Bovais, K. Cochrell, K. C. Goins, R. Barbehenn, D. S. Katzer, K. Ikossi-Anastasiou y M. J. Montes, *Large-Aperture Multiple Quantum Well Modulating Retroreflector for Free-space Optical Data Transfer on Unmanned Aerial Vehicles.*Opt. Eng. **40**(7), 1348-1356 (2001).

[21] L. Sjöqvist, E. Hällstig, J. Öhgren y L. Allard, *Retrocommunication - Final Report.* Swedish Defence Research Report FOI report FOIR-R-01220-SE (2004).

[22] T. Mikaelian, M. Weel, A. Kumarakrishnan, P. R. Battle y R. C. Swanson, *A high-speed retro-reflector for free-space communication based on electro-optic phase modulation*. Can. J. Phys. **81**(4), 639-650 (2003).

[23] E. Hecht, *Óptica*. 3ª edición. Addison Wesley Iberoamericana: Madrid (2000).

[24] E. Collet, *Polarized Light: Fundamentals and applications*. Marcel Dekker: Nueva York (1993).

[25] S. E. Segre y V. Zanza, *Mueller calculus of polarization change in the cube-corner retroreflector*, J. Opt. Soc. Am. **20**(9), 1804-1811 (2003).

[26] X. Quitana, M. A. Geday, G. Abbate, F. Vita, B. Bellini y J. M. Otón, *Technique for real time measurement of state of polarization.* OPTOEL **5** (2007).

[27] B. Bellini, V. Urruchi, N, Gaona, J. M. Sánchez Pena, J. M. Otón y M. A. Geday, *Induced phase delay and state of polarization in V shape smectic liquid crystals.* Intl. LC-P'06 (2006).

[28] J. Gowar, *Optical Communication Systems*. Prentice-Hall International: Londres (1984).