

SISTEMA DE CONTROL VISUAL PARA EL POSICIONAMIENTO DE UN EQUIPO DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES ESTELARES



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER



ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES



CENTRO HALLEY DE ASTRONOMÍA Y
CIENCIAS AEROESPACIALES



GRUPO DE ÓPTICA Y TRATAMIENTO DE
SEÑALES



GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN
CONTROL, ELECTRÓNICA, MODELADO Y
SIMULACIÓN

Autores

ÁNGELA KARINA GÉLVEZ ESPINEL COD. 1996243
JULIÁN GUSTAVO RODRÍGUEZ FERREIRA COD. 1996272

**ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES.
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS.
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.
BUCARAMANGA, FEBRERO DE 2006.**

SISTEMA DE CONTROL VISUAL PARA EL POSICIONAMIENTO DE UN EQUIPO DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES ESTELARES



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER



ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES



CENTRO HALLEY DE ASTRONOMÍA Y
CIENCIAS AEROESPACIALES



GRUPO DE ÓPTICA Y TRATAMIENTO DE
SEÑALES



GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN
CONTROL, ELECTRÓNICA, MODELADO Y
SIMULACIÓN

Trabajo de grado para optar el título de ingeniero electrónico

Presentado Ante

CONSEJO DE ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES

Autores

ÁNGELA KARINA GÉLVEZ ESPINEL COD. 1996243
JULIÁN GUSTAVO RODRÍGUEZ FERREIRA COD. 1996272

Director

ARTURO PLATA GÓMEZ Ph.D

Codirectores

DANIEL ALFONSO SIERRA BUENO M.Sc.
JORGE MEJÍA CABEZA Ph.D

ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES.
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS.
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.
BUCARAMANGA, FEBRERO DE 2006.

*A mis queridos padres Gustavo y Carmen,
por haberme dado la oportunidad de existir
y formarme libremente junto a sus principios y valores.*

A Johanna, mi entrañada hermana.

*A mi familia y amigos,
quienes siempre me han brindado su apoyo incondicional.*

*A todos mis amigos del Centro Halley,
con quienes he compartido y construido el mismo sueño.*

...A la memoria y recuerdo de aquellos que hoy ya no están.

Gracias...totales.

Julían Gustavo Rodríguez Ferreira.

Febrero de 2006.

*A mis padres Luisa y Gilberto y a mis hermanos, Tico y Lilitiana
a quienes les debo todo.*

A mis amigos, por permitirme tener la suerte de siempre contar con ellos.

A E.R.A. por ser una escuela en muchos aspectos de mi vida.

A mi mamá Lilita y mi tía Nancy por siempre ver lo mejor de mí.

A mis tíos y primos, por todo su apoyo y cariño.

*A todos aquellos que han hecho posible culminar las diferentes metas de mi
vida, a quienes me han dado su apoyo, amistad y me han permitido ver
nuevos horizontes.*

A quienes han estado ahí en el momento indicado.

Gracias.

Ángela Karina Gélvez Espinel

Febrero de 2006.

AGRADECIMIENTOS

Para comenzar, nuestro sentimiento más profundo de gratitud es hacia el Dr. Arturo Plata, director de esta tesis, quien compartió con nosotros todos sus conocimientos y calidez humana. Igualmente queremos agradecer a nuestros co-directores el Dr. Jorge Mejía y el Dr. Daniel Sierra, por sus aportes y sugerencias.

Dentro de las instituciones vinculadas al proyecto, queremos manifestar nuestra gratitud a cada uno de los miembros del centro Halley de astronomía, el grupo de óptica y tratamiento de señales de la escuela de física de la UIS, el grupo CEMOS y el grupo CPS de la escuela de ingenierías eléctrica, electrónica y telecomunicaciones de la UIS.

Igual atención merecen nuestros amigos del Observatorio astronómico de la Universidad Sergio Arboleda (Bogotá), a su director, el Dr. Raúl Joya, Josiph Toscano, John Jairo Parra, Orlando Katime y demás colaboradores, muchas gracias por la excelente capacitación, realmente nos hicieron sentir como en casa durante la pasantía que realizamos en su institución. También queremos agradecer al CIC y al físico Hernán Garnica por su valiosa asesoría técnica.

Queremos exaltar el apoyo de nuestras familias y amigos, con una mención especial a los ingenieros Jorge Ramón, Juan Carlos Mateus, Roger Martínez, Julián Ordóñez, Christian Arenas, Cesar Suárez y la diseñadora María Isabel Suárez, quienes nos facilitaron los componentes del sensor estelar, así como su compañía durante algunas de las largas y frías noches de trabajo.

Finalmente, presentamos nuestras excusas si por omisión excluimos el nombre de alguien que sea parte de estos agradecimientos. Sin la colaboración de cada una de las personas e instituciones arriba mencionadas, este sueño no se hubiese materializado.

Tabla de contenido

1	RESUMEN	xvii
2	INTRODUCCIÓN.....	1
3	Marco Teórico	4
3.1	Orientación en astronomía	5
3.1.1	Trigonometría esférica.....	5
3.1.1.1	Ángulos esféricos	5
3.1.1.2	Triángulos esféricos	6
3.1.1.3	Solución general del triángulo esférico.....	6
	Teorema del seno de la trigonometría esférica.....	7
	Teorema del coseno de la trigonometría esférica.....	7
	Teorema del seno por el coseno	7
3.1.2	Astronomía	7
3.1.2.1	Astronomía de posición	8
	La esfera celeste	8
	Componentes de la esfera celeste	9
	Movimientos terrestres	11
	Coordenadas geográficas.....	13
	Variación del cielo según la latitud del observador.....	14
	Sistemas de coordenadas astronómicas.....	15
	Las coordenadas horizontales	15
	Coordenadas ecuatoriales absolutas.....	17
3.1.2.2	Catálogos estelares.....	18
3.1.3	Astrometría.....	19
3.1.3.1	Determinación de las coordenadas	19
	Determinación del centro de un objeto	19
	Coordenadas estándar y constantes de placa	23
3.2	Sistemas de observación	29
3.2.1	Telescopios	29
3.2.1.1	Conceptos básicos de óptica.....	30

3.2.1.2	Elementos y funcionamiento del telescopio.....	31
3.2.1.3	Clases de telescopios.....	33
	Telescopios refractores	33
	Telescopios reflectores.....	34
	Telescopios catadióptricos.....	34
3.2.2	Monturas.	35
3.2.3	Astrofotografía	36
3.3	Sistemas de automatización.....	37
3.3.1	Etapas de los sistemas automatizados	38
3.3.1.1	Medición	38
3.3.1.2	Evaluación	38
3.3.1.3	Control realimentado	38
3.4	Etapas de un sistema de visión artificial.....	39
3.4.1	Adquisición de imágenes.....	40
3.4.1.1	Sistemas de adquisición de imágenes	40
3.4.2	Preprocesado	41
3.4.2.1	Tomas oscuras brutas	42
3.4.2.2	Tomas planas brutas	43
3.4.3	Segmentación.....	43
3.4.4	Representación y descripción.....	43
3.4.5	Reconocimiento e interpretación	44
3.5	Estado del arte	44
3.5.1	Presentación y antecedentes	44
3.5.1.1	Proceso de apuntamiento manual.....	45
3.5.2	Soluciones existentes.....	47
3.5.2.1	Sistemas de electrónica discreta	47
3.5.2.2	Sistemas híbridos de óptica y electrónica	48
3.5.2.3	Actualidad de los sensores estelares	50
3.5.2.4	Actualidad de los algoritmos de identificación	53
4	DESARROLLO EXPERIMENTAL	54
4.1	Introducción.....	54

4.2	ESQUEMA GENERAL DE OEIL 1.O.....	56
4.3	Sistema de adquisición.....	58
4.3.1	Sensor estelar R ₂ D ₂	58
4.3.1.1	Características.....	58
4.3.2	Etapas de diseño.....	62
4.3.2.1	De webcam a sensor estelar	64
4.3.3	Caracterización del sensor estelar	69
4.4	Automatización y control	76
4.4.1	Características telescopio Meade.....	76
4.4.2	Puertos.....	77
4.4.2.1	Puerto serie	77
4.4.3	Modificaciones.....	78
4.4.3.1	Remoción buscador principal	78
4.4.3.2	Cable de conexión serial al Autostar	79
4.5	Algoritmos	80
4.5.1	Indexado.....	80
4.5.2	Detección e identificación de las estrellas en la imagen.....	84
4.5.2.1	Algoritmo de detección	85
4.5.2.2	Etapas de identificación	95
4.5.3	Seguimiento.....	101
4.5.4	Modo GoTo.....	104
4.5.4.1	Control del telescopio	106
5	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	108
5.1	Descripción de las pruebas	108
5.2	Aciertos y errores.	109
5.3	Tiempos de ejecución.....	112
6	Conclusiones.....	116
6.1	Verificación de objetivos.....	116
6.2	Aplicaciones directas del proyecto	117
6.3	Acerca de Matlab 7.0®.....	118

6.4	Acerca del sensor estelar	118
6.5	Recomendaciones y observaciones	119
7	Bibliografía.	121

Índice de Anexos

Anexo A	Manual del usuario OEIL 1.0	125
A.1	Requerimientos computacionales	125
A.2	Iniciar oeil 1.0	127
A.3	La interfaz.....	128
A.4	Realizando una identificación.....	148
A.5	Realizando seguimiento.....	150
A.6	Acerca de la adquisición del video.....	150
Anexo B	Set de instrucciones del telescopio Meade lx-90; LX200	151
Anexo C	Cotización primer diseño sensor estelar.....	163
Anexo D	Plano estructural y vistas del sensor estelar.....	166

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Intersección de una esfera con un plano	5
Figura 2 El ángulo esférico	6
Figura 3 Triángulo esférico	6
Figura 4 Componentes de la esfera celeste, independientes de la posición del observador.....	9
Figura 5 Componentes de la esfera celeste, dependientes de la posición del observador.....	10
Figura 6 El plano de la eclíptica.....	12
Figura 7 Variación del cielo, según la latitud.....	15
Figura 8 Sistema de coordenadas horizontales.....	15
Figura 9 Sistema de coordenadas ecuatoriales.....	17
Figura 10 Proyecciones sobre el plano tangente.....	24
Figura 11 Proyección de la estrella polar sobre el plano tangente.....	25
Figura 12 Triángulo esférico	26
Figura 13 Vista superior del plano π	26
Figura 14 Formación de Imágenes en una lente y en un espejo.	31
Figura 15 Funcionamiento del Telescopio.	32
Figura 16 El telescopio refractor	33
Figura 17 El telescopio reflector.....	34
Figura 18 El telescopio Schmidt-Cassegrain	35
Figura 19 Diferentes tipos de monturas	36
Figura 20 Técnicas de astrofotografía	37
Figura 21 Etapas fundamentales de un sistema de Visión Artificial.....	39
Figura 22 Esquema General del proceso de Preprocesado.	42

Figura 23 Detalle de un sistema MOEM	52
Figura 24 Disposición de los elementos ópticos y electrónicos de un sistema MOEM.....	52
Figura 25 Esquema general del proyecto	54
Figura 26 Diagrama general de bloques.....	56
Figura 27 El sensor estelar R_2D_2	58
Figura 28 Etapas en el diseño del sensor R_2D_2	62
Figura 29 Medición experimental de la distancia focal del sensor R_2D_2	65
Figura 30 Anillo de acople para lentes tipo C	66
Figura 31 Primer diseño del sensor estelar R_2D_2	66
Figura 32 Diseño final del sensor estelar R_2D_2	68
Figura 33 El sensor estelar sobre el telescopio.	68
Figura 34 Montaje de todo el sistema.	69
Figura 35 La estrella Sirio registrada con el sensor.	70
Figura 36 Acercamiento sobre Mintaka	71
Figura 37 Variación en los niveles de Intensidad para Mintaka.	72
Figura 38 Formato de envío de datos serial	77
Figura 39 Sistema Buscador-soporte del telescopio Meade LX-90	78
Figura 40 Conexión serial computador telescopio. Conectores DB9- RJ-11.	79
Figura 41 Cable de conexión adaptado	79
Figura 42 Algoritmo para el indexado del catálogo.	81
Figura 43 Principio de indexado.....	82
Figura 44 Selección de estrellas a indexar.	83
Figura 45 Esquema general del catálogo indexado	84
Figura 46 Etapas del procesamiento realizado	84
Figura47 Diagrama de flujo del algoritmo de detección	86
Figura 48 Preprocesado de la señal.	87
Figura 49 Nivel de intensidad de Marte, sin pre-procesamiento	88
Figura 50 Nivel de intensidad de Marte, con pre-procesamiento.....	89
Figura 51 Histograma de una estrella.	90

Figura 52 Binarización de Sirio	91
Figura 53 Binarización del cinturón de Orión	91
Figura 54 Determinación de los centroides en la imagen	92
Figura 55 Diagrama de bloques algoritmo identificación.	95
Figura 56 Estructura del catálogo indexado.....	98
Figura 57 Búsqueda de la estrella 2	99
Figura 58 Ejemplo de búsqueda	100
Figura 59 Diagrama de bloques del control del seguimiento.	104
Figura 60 Diagrama de flujo Goto	105
Figura 61 Diagrama de flujo del control de los motores del telescopio.	107
Figura 62 Histograma de aciertos.	110
Figura 63 Histograma de la media de los tiempos de ejecución	112
Figura 64 Tiempos de ejecución para un FOV de 5°	115
Figura 65 Ventana de inicialización	127
Figura 66 Ventana principal	127
Figura 67 Esquema general de OEIL.....	129
Figura 68 Menú archivo	129
Figura 69 Menú guardar resultados	130
Figura 70 Menú Visión nocturna	131
Figura 71 Aplicación DarkAdapted ©.....	131
Figura 72 Menú Telescopio	132
Figura 73 Menú cámara.....	132
Figura 74 Configuración del sensor	133
Figura 75 Selección de propiedades en la configuración del sensor	134
Figura 76 Configuración de parámetros avanzados del sensor.	135
Figura 77 Adquisición de video	136
Figura 78 Guardar imagen.....	137
Figura 79 Menú catálogo	138
Figura 80 Configuración del catálogo estelar.....	138
Figura 81 Configuración catálogo estelar	139

Figura 82 Indexado del catálogo.....	140
Figura 83 Menú ayuda	141
Figura 84 Ayudas emergentes	142
Figura 85 Control de identificación y seguimiento.....	142
Figura 86 Reducción astrométrica.	144
Figura 87 Abrir imagen	144
Figura 88 Resultados.....	146
Figura 89 Control del telescopio.	147
Figura 90 Reloj.....	147
Figura 91 Mensaje de error.....	148
Figura 92 Mensaje Advertencia	148
Figura 93 El programa OEIL funcionando.....	149

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Componentes del sensor estelar R_2D_2	59
Tabla 2 Dispositivos utilizados en el diseño del sensor R_2D_2	64
Tabla 3 Coordenadas de las estrellas del cinturón de Orión	73
Tabla 4 Distancias angulares entre las estrellas del cinturón de Orión.....	74
Tabla 5 Distancias de separación sobre la imagen, para las estrellas del cinturón de Orión	74
Tabla 6 Estimación de la resolución del sensor	75
Tabla 7 Características telescopio Meade	77
Tabla 8 Estrellas – aciertos.....	111
Tabla 9 Media de los tiempos de ejecución	113
Tabla 10 Varianza de los tiempos de ejecución.....	113
Tabla 11 Tiempos de ejecución para diferentes catálogos	114
Tabla 12 Tiempos de ejecución para un FOV de 5°	115

1 RESUMEN

TÍTULO: SISTEMA DE CONTROL VISUAL PARA EL POSICIONAMIENTO DE UN EQUIPO DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES ESTELARES*

AUTORES: Gélvez Espinel, Ángela Karina, y, Rodríguez Ferreira, Julián Gustavo**

PALABRAS CLAVE: Posicionar, telescopio, controlar, visión artificial, sensor estelar, estrellas, tratamiento de imágenes, retroalimentación.

DESCRIPCIÓN:

Se presenta una solución al problema de posicionar un telescopio y controlar el seguimiento que este pudiese realizar a un cuerpo celeste.

Se ha recurrido a los sistemas de visión artificial, desarrollándose un sensor estelar llamado "R₂D₂", conformado por un sensor CMOS y la óptica correspondiente y "Oeil 1.0" que es un paquete de software que funciona bajo el entorno de Matlab 7.0®, integrado en una interfaz gráfica que permite una fácil interacción entre el usuario y el sistema.

Dicho software contiene una serie de algoritmos diseñados para realizar la captura de la imagen, la cual es preprocesada, dando como resultado la reducción de los diferentes niveles de ruido presentes en la imagen (Dark current, Bias, Rayos cósmicos).

Una vez superada esta etapa, la imagen ya acondicionada es procesada, para así poder identificar las estrellas y sus respectivos centroides, obteniéndose un conjunto de relaciones geométricas entre ellas.

Los datos obtenidos de la reducción son comparados con los de una base de datos, en un proceso que tiene como finalidad la identificación plena de cada una de las estrellas de la imagen.

El software también está en la capacidad de generar bases de datos de acuerdo a las características del sensor estelar, dándole al sistema flexibilidad y adaptabilidad a diferentes parámetros de configuración definidos por el usuario.

Finalmente el seguimiento se realiza por procesamiento digital de imágenes, en donde se extraen los datos necesarios para formular una trayectoria, la cual acciona los motores del telescopio y posteriormente es corregida gracias a la toma de decisiones que realiza el software desde la retroalimentación del sistema, generada por la adquisición constante de nuevas imágenes.

* Trabajo de grado.

** Facultad de ingenierías físico-mecánicas. Ingeniería electrónica. Arturo Plata Gómez Ph.D

ABSTRACT

TITLE: VISUAL CONTROL SYSTEM FOR THE POSITIONING OF STELLAR IMAGES ACQUISITION EQUIPMENT*

AUTHORS: Gélvez Espinel, Ángela Karina, y, Rodríguez Ferreira, Julián Gustavo**

KEY WORDS: Positioning, telescope, controlling, artificial vision systems, stellar sensor, stars, image processing, feedback.

DESCRIPTION OF THE PROJECT

A solution appears to the problem of positioning a telescope and controlling the pursuit that this could make to a celestial body.

Resorting to the artificial vision systems, a stellar sensor called "**R₂D₂**" is developed, conformed by a CMOS sensor and the respective optic and "**Oeil 1.0**", that is a software package that works under the Matlab 7.0® environment, built in a graphical interface that allows an easy interaction between the user and the system.

This software contains a series of algorithms designed to make the capture of the image, which is processed, giving as a result the reduction of the different levels of noise found in the image (Dark current, Bias, Cosmic rays).

Once this stage is overcome, the image already conditioned is processed, in order to make possible the identification of the stars and their respective centroids, obtaining a set of geometric relations between them.

The facts obtained from the reduction are compared to the information of a data base, in a process of which a complete identification of each one of the stars on the image is expected.

The software is also able to generate data bases according to the characteristics of the stellar sensor, giving the system flexibility and adaptability to different parameters of configuration defined by the user.

Finally, the pursuit is made by image processing, where the necessary information to formulate a predictive path is extracted. This path makes the motors of the telescope work and is later corrected thanks to the decision-making that the software achieves from the system feedback, generated by the constant acquisition of new images.

* Degree work.

** Facultad de ingenierías físico-mecánicas. Ingeniería electrónica. Arturo Plata Gómez Ph.D

2 INTRODUCCIÓN

Desde el advenimiento del telescopio en el siglo XVI, hasta el día de hoy, han venido siendo desarrollados diferentes clases de equipos de medición y registro de señales estelares, permitiendo el estudio y análisis de todo el universo por medio de la información capturada. Estas señales se ubican a lo largo de todo el espectro electromagnético.

En un comienzo estos dispositivos basaban su funcionamiento en el empleo de elementos ópticos y mecánicos, con la precisión que la tecnología de la época podía brindar. Con el transcurrir de los años, el desarrollo del método científico y la revolución industrial trajeron consigo nuevas ciencias, como la electrónica, las cuales permitieron incrementar la calidad y precisión en los diseños.

La necesidad de diseñar dispositivos de adquisición de señales estelares, con mayores prestaciones, se fundamenta en la naturaleza de las señales estudiadas.

Al captar señales estelares (sin importar de que tipo), con la calidad suficiente para obtener datos precisos y por ende conclusiones fiables, se deben aumentar los tiempos de captura. Esto es debido a que las señales captadas son muy débiles y deterioradas a causa de haber recorrido las enormes distancias que las separan de los detectores y atravesado variedad de medios como el espacio interestelar y/o la atmósfera terrestre.

Al aumentar los tiempos de captura, se debe considerar la dinámica propia del entorno, debido a los movimientos terrestres y orbitales, hay que controlar y sintonizar de manera adecuada todo el instrumental, si se quiere mantener el equipo apuntando hacia la zona de estudio.

Desde que se comenzaron a desarrollar los diferentes equipos de adquisición de datos estelares, nacieron dos situaciones que han venido siendo fuente de estudio de diferentes investigadores, quienes han logrado avances significativos en el área de la instrumentación en astronomía y astrofísica.

Las dos situaciones a las que se hace referencia son posicionar adecuadamente los instrumentos de medida y mantenerlos direccionados hacia la fuente de estudio, sin importar la dinámica del medio en el que se encuentre.

En el presente trabajo de grado titulado “***Sistema de control visual para el posicionamiento de un equipo de adquisición de imágenes estelares***”, se ha diseñado e implementado un prototipo, el cual permite posicionar y controlar un telescopio en tierra, bajo el peor escenario del que se puede partir, este se conoce como “lost in space” o perdido en el espacio, en donde se posiciona y controla el sistema sin ningún conocimiento a priori que indique las coordenadas de apuntamiento, ni la dinámica que lo rodea.

Para poder materializar este prototipo, se ha hecho uso de diferentes herramientas que brinda la ingeniería electrónica y la astronomía. El marco teórico, contenido en el capítulo 3, presenta dichas herramientas junto con el estado actual de la ciencia, donde se advierte la estrecha relación de esta investigación con los sistemas de posicionamiento presentes en los satélites artificiales, telescopios y sondas espaciales.

Como se explicará, el prototipo que se realizó es un sistema de visión artificial que posee dos componentes principales, una de hardware y otra de software.

El hardware es conformado por el sensor estelar R_2D_2 , el cual será explicado a profundidad en el capítulo 4, allí se muestra todo el desarrollo experimental, ilustrando las características del diseño alcanzado. Hacia el final del capítulo se

explican los principales algoritmos que permiten realizar la identificación del campo estelar y el seguimiento a una estrella.

Más adelante, en el capítulo 5, se globalizan los resultados alcanzados por medio del estudio de las pruebas de campo y simulación a las que fue sometido el proyecto, mostrando el desempeño de los algoritmos desarrollados.

El segundo componente es el software de control llamado **OEIL 1.0**, donde La principal herramienta utilizada, ha sido el procesamiento digital de imágenes estelares.

El sistema es controlado por una serie de algoritmos que han sido implementados bajo una interfaz gráfica en el entorno de Matlab 7.0®, la cual gobierna todos los procesos, permitiendo una eficiente interacción hombre-máquina. Dicha interfaz ha sido diseñada bajo los parámetros que la programación orientada a objetos requiere. En el anexo A, se explicará cada una de sus partes y la forma de operarla.

Finalmente se debe mencionar que a lo largo del presente texto se muestra el aporte que ha brindado este proyecto en el trabajo actual y futuro de diferentes grupos de investigación de la Universidad Industrial de Santander.

La vinculación de esta tesis a dichos grupos, entre los que se destacan el Centro Halley de Astronomía, el Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales, pertenecientes a la escuela de Física y los grupos CEMOS y CPS de la Escuela de Ingenierías Eléctrica y Electrónica, sustentan la importancia de estudiar los sistemas de visión artificial, para el desarrollo de los sistemas de control dinámico.

3 MARCO TEÓRICO

El *“sistema de control visual para el posicionamiento de un equipo de adquisición de imágenes estelares”* es un proyecto en el cual se combinan tópicos de diferentes disciplinas tales como astronomía y el tratamiento digital de imágenes.

Antes de abordar el desarrollo del sistema, se hace necesario conocer los principales conceptos que se abarcan, para así comprender de una forma más clara los diferentes contenidos presentes en este proyecto de grado.

En este capítulo, se tratan en primer lugar, los temas referentes a la astronomía, iniciando con la trigonometría esférica y astrometría, los cuales permitirán más adelante, comprender las coordenadas celestes.

Los elementos de la astronomía de posición acá explicados son unas de las variables fundamentales en el problema de posicionamiento manejado en el proyecto.

Posteriormente, se abordan los conceptos de los sistemas de observación, con el fin de ilustrar el tipo de telescopio en el que será implementado el sistema.

Una vez establecido el entorno de los problemas tratados, se inicia la etapa de fundamentos teóricos que involucran el enfoque de las soluciones del proyecto.

Entre estos temas se incluyen la automatización y el tratamiento digital de imágenes, que finalmente conducen hacia la revisión del estado del arte, estableciendo así un contexto general, que permite integrar la teoría con el desarrollo experimental.

3.1 Orientación en astronomía

3.1.1 Trigonometría esférica

La trigonometría es el estudio de los componentes de un triángulo. La trigonometría esférica¹ estudia los ángulos trazados sobre esferas y las diferentes relaciones y funciones que hay entre estos.

3.1.1.1 Ángulos esféricos

La intersección de un plano con una esfera produce una circunferencia, la cual se llama máxima si el plano pasa por el centro de la esfera, de lo contrario recibe el nombre de circunferencia menor (Véase la figura 1)

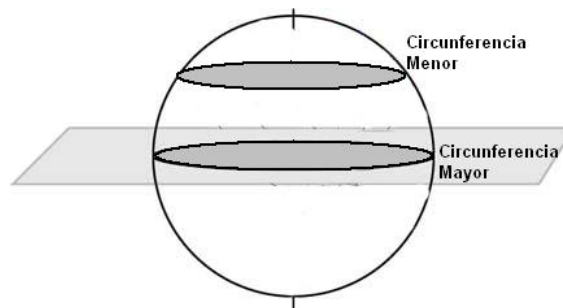


Figura 1 Intersección de una esfera con un plano

Fuente: Autores.

El ángulo formado, sobre una esfera, por dos arcos secantes de circunferencias máximas se denomina ángulo esférico, las circunferencias máximas que lo forman son los lados del ángulo y el punto de intersección de los arcos es el vértice.

¹ Un excelente texto para el estudio de la trigonometría plana y esférica es [31], que incluye ejercicios aplicados a la astronomía.

Para la figura 2, APB es el ángulo esférico de la esfera con centro en O y vértice en P. La medida del ángulo esférico está dada por el arco que forman los lados sobre la circunferencia máxima, que para este caso es el arco AB.

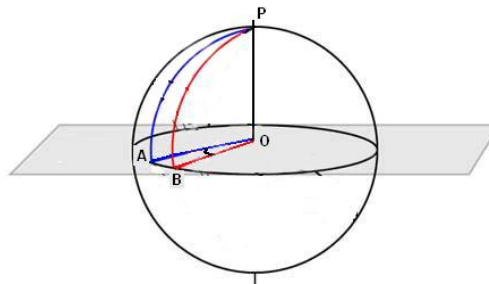


Figura 2 El ángulo esférico

Fuente: Autores.

3.1.1.2 Triángulos esféricos

El área delimitada por la intersección de tres circunferencias máximas se denomina triángulo esférico. Para la figura 3, se define el triángulo esférico de ángulos A,B,C y lados opuestos a,b,c.

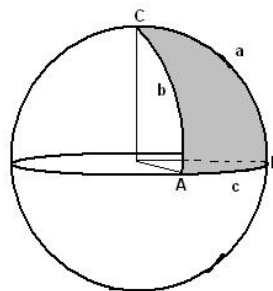


Figura 3 Triángulo esférico

Fuente: Autores.

3.1.1.3 Solución general del triángulo esférico

Para los triángulos esféricos como el de la figura 3 y en general para cualquier triángulo esférico, luego de aplicar diversas propiedades de la trigonometría esférica, se llega a los siguientes teoremas:

Teorema del seno de la trigonometría esférica

$$\frac{\text{sen}(A)}{\text{sen}(a)} = \frac{\text{sen}(B)}{\text{sen}(b)} = \frac{\text{sen}(C)}{\text{sen}(c)} \quad (1)$$

Teorema del coseno de la trigonometría esférica

$$\begin{aligned} \cos(b) &= \cos(a) \cos(c) + \text{sen}(a) \text{sen}(c) \cos(B) \\ \cos(c) &= \cos(a) \cos(b) + \text{sen}(a) \text{sen}(b) \cos(C) \\ \cos(a) &= \cos(c) \cos(b) + \text{sen}(c) \text{sen}(b) \cos(A) \end{aligned} \quad (2)$$

Teorema del seno por el coseno

$$\begin{aligned} \cos(A) \text{sen}(b) &= -\cos(B) \text{sen}(a) \cos(c) + \cos(a) \text{sen}(c) \\ \cos(A) \text{sen}(c) &= -\cos(C) \text{sen}(a) \cos(b) + \cos(a) \text{sen}(b) \\ \cos(B) \text{sen}(a) &= -\cos(A) \text{sen}(b) \cos(c) + \cos(b) \text{sen}(c) \\ \cos(B) \text{sen}(c) &= -\cos(C) \text{sen}(b) \cos(a) + \cos(b) \text{sen}(a) \\ \cos(C) \text{sen}(a) &= -\cos(A) \text{sen}(c) \cos(b) + \cos(c) \text{sen}(b) \\ \cos(C) \text{sen}(b) &= -\cos(B) \text{sen}(c) \cos(a) + \cos(c) \text{sen}(a) \end{aligned} \quad (3)$$

3.1.2 Astronomía

Ciencia que permite el estudio conjunto del universo. Mediante el uso del método científico busca explicar su origen, estructura, composición y evolución.

El estudio de la astronomía se subdivide en varias categorías de acuerdo a su especialidad, resaltan la Astrofísica, Cosmología, Astronomía estelar y Planetaria, Astronomía de posición, Astrobiología, Mecánica Celeste e Instrumentación astronómica.

² En [1] se encuentra la demostración de este teorema.

3.1.2.1 Astronomía de Posición

Rama de la astronomía que permite determinar la posición aparente sobre la esfera celeste, de todos los cuerpos celestes, mediante el uso de sistemas de referencia y planos fundamentales. Se compone de:

* **Astronomía esférica**

Estudia las relaciones entre las direcciones cambiantes de los cuerpos celestes con sus posiciones sobre la superficie de la esfera celeste.

* **Astronomía dinámica**

Estudia todas las relaciones fisicomatemáticas que explican el movimiento de los cuerpos celestes, bajo fuerzas tales como la gravitación universal.

La esfera celeste

Un observador cualquiera, que mira al cielo desde la superficie de la Tierra, no tiene ninguna percepción directa de las distancias que lo separan de los astros. Para él, todos los astros aparecen como si estuvieran a la misma distancia³ y fijos sobre el cielo, rodeándolo dentro de lo que se conoce como la **esfera celeste**.

La esfera celeste es una abstracción matemática que considera a la Tierra el centro del Universo, donde todos los astros se proyectan sobre su superficie y rotan a igual velocidad alrededor del observador, ubicado en el centro de dicha esfera⁴.

³ Esta distancia ha de ser muy grande, debería ser infinita; pero en términos prácticos se considera una distancia unitaria.

⁴ Un observador, sobre la superficie de la Tierra, solo aprecia media esfera en un instante dado, pues el horizonte limita la otra mitad.

Para establecer la posición y coordenadas de un astro en el cielo, es necesario conocer las diferentes componentes de dicha esfera.

Componentes de la esfera celeste

* Independientes de la posición del observador

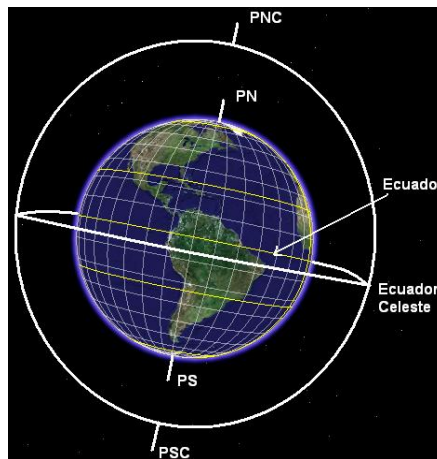


Figura 4 Componentes de la esfera celeste, independientes de la posición del observador.

Fuente: Autores.

Ecuador Celeste

Como se aprecia en la figura 4, es el plano perpendicular al eje de rotación de la Tierra, que pasa por el centro de esta y corta la esfera celeste formando una circunferencia.

Polo Norte Celeste (PNC)

Proyección sobre la esfera celeste del polo norte terrestre (PN).

Polo Sur Celeste (PSC)

Proyección sobre la esfera celeste del polo sur terrestre (PS).

* **Dependientes de la posición del observador**

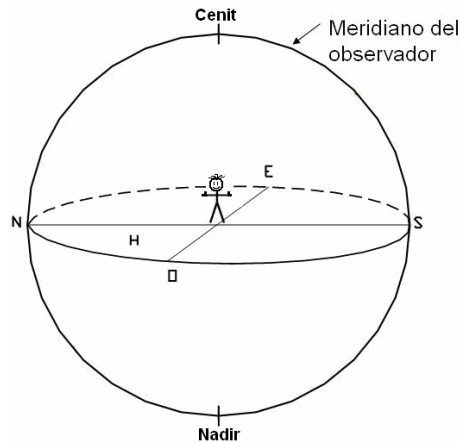


Figura 5 Componentes de la esfera celeste, dependientes de la posición del observador

Fuente: Autores.

El cenit y el nadir

Como se ve en la figura 5, el punto de la esfera celeste que se encuentra exactamente sobre la cabeza del observador se denomina cenit y el punto opuesto, que se encuentra justo bajo los pies del observador es el nadir.

Horizonte Matemático

Plano tangente a la Tierra en la posición del observador⁵.

Meridiano del observador

Arco sobre la esfera celeste que une el polo norte celeste con el polo sur celeste; sobre él se encuentra el cenit del observador.

Puntos Cardinales

Sistema de referencia cartesiano, que permite la orientación en un mapa, dadas ciertas direcciones⁶ marcadas en una brújula.

⁵ Es de suponer que debido a la geometría de la Tierra, no existen dos horizontes iguales.

Movimientos terrestres

La Tierra, como los demás cuerpos celestes, no se encuentra en reposo, sino que está sujeta a un movimiento complejo cuyas principales componentes son la rotación y la traslación.

La rotación de la Tierra

La Tierra, aproximadamente cada 23 h 56 minutos, realiza una vuelta completa alrededor de un eje ideal que pasa por los polos, en dirección Oeste-Este, produciendo la impresión de que el cielo gira alrededor del planeta en dirección opuesta. A este movimiento, denominado rotación, se debe la sucesión de días y noches.

Suponiendo que la Tierra sólo rotase, todas las noches se verían las mismas estrellas a la misma hora, con el cielo girando a una velocidad aproximada de 15° por hora.

La traslación terrestre

La Tierra gira en torno al sol sobre una órbita elíptica, cumpliendo una revolución en 365.256 días. Esto implica una razón de 0.9856° por día; en consecuencia, lo que se está apreciando un día a una hora determinada, se volverá a ver allí un año después.

Como consecuencia directa de la rotación y traslación, el cielo está en continuo movimiento para un observador cualquiera. Si este realizara la observación de un cuerpo celeste, por algún lapso de tiempo, notará que toda la esfera celeste se desplaza a una razón constante.

⁶ Las más conocidas son la Norte, Sur, Oriente y Occidente.

Ahora, si se desea realizar una observación prolongada con algún instrumento, se debe compensar este movimiento, para que el objeto de interés no se salga del campo de observación.

La eclíptica

El plano sobre el cual la tierra se traslada alrededor del sol se conoce como la eclíptica (Véase la figura 6), este plano corta la esfera celeste formando un círculo que se encuentra inclinado respecto al ecuador $23,5^{\circ}$; estos dos planos se intersectan formando una recta que señala la dirección del punto vernal.

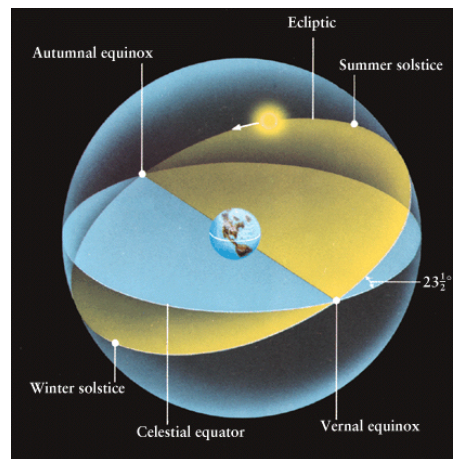


Figura 6 El plano de la eclíptica

Fuente: <http://wisp.physics.wisc.edu/astro104/lecture2/lec2g.html>

El día en que el Sol pasa del hemisferio sur celeste al hemisferio norte celeste (cortando el ecuador celeste), se conoce como equinoccio de primavera (21 de Marzo⁷). El lugar sobre la esfera celeste donde el Sol está ese día, se conoce como el **punto vernal**.

⁷ Aunque esta fecha varía debido a la precesión de los equinoccios

Como se verá más adelante este punto es de vital importancia en los sistemas de coordenadas astronómicas. Debido a la precesión de los equinoccios el punto vernal retrocede 50,25" por año.

Coordenadas geográficas

Las coordenadas geográficas son aquellas coordenadas que indican la posición de un observador o de un lugar sobre la superficie terrestre. Estas coordenadas tienen gran importancia en navegación. Se definen los siguientes términos de gran uso en astronomía.

Paralelos: Son los círculos menores paralelos al Ecuador.

Meridianos: Son los círculos máximos que pasan por los polos y son normales al Ecuador.

Latitud: es el arco de meridiano medido desde el Ecuador al punto de interés. La latitud siempre es menor o igual a 90° y se llama latitud Norte cuando el sitio se encuentra en el Hemisferio Norte y latitud Sur cuando se está en el Hemisferio Sur.

Longitud: Es el arco medido sobre el Ecuador, desde el meridiano de Greenwich, hasta el meridiano superior del lugar. Se cuenta máximo hasta 180° , además se nombra longitud Oeste (W) cuando el lugar queda al oeste del meridiano de Greenwich y longitud Este (E) cuando el lugar queda al este del meridiano.

Variación del cielo según la latitud del observador

Asumiendo una forma esférica⁸ para la Tierra, dos observadores sobre su superficie, tendrán horizontes diferentes, siendo esto más notorio a medida que aumenta la diferencia de latitud que los separa.

El eje de rotación terrestre estará inclinado respecto al horizonte de cada observador, un ángulo igual a la latitud del sitio de observación. Luego la apariencia del cielo varía para cada latitud.

El cielo desde el Polo Norte⁹

Al realizar una observación justo sobre el Polo Norte, el eje de rotación terrestre coincide con el cenit. Durante una noche de observación se aprecia que las estrellas¹⁰ nunca se ocultan, siempre permanecen visibles describiendo círculos paralelos al horizonte. (Véase la figura 7).

El cielo desde el Ecuador

Al observar el cielo desde el ecuador terrestre, el eje de rotación está a una altura de 0° sobre el horizonte; es decir perpendicular al cenit, luego todos los astros describen trayectorias perpendiculares al horizonte. (Véase la figura 7).

El cielo desde latitudes medias

Al observar el cielo desde una latitud que se encuentre entre el ecuador y cualquiera de los polos, los astros en el cielo siguen trayectorias inclinadas, según la latitud del sitio. (Véase la figura 7).

⁸ Sabiendo que en realidad es un geoide.

⁹ El mismo razonamiento se aplica para el Polo Sur

¹⁰ Nótese que solo son visibles las estrellas del hemisferio norte celeste.

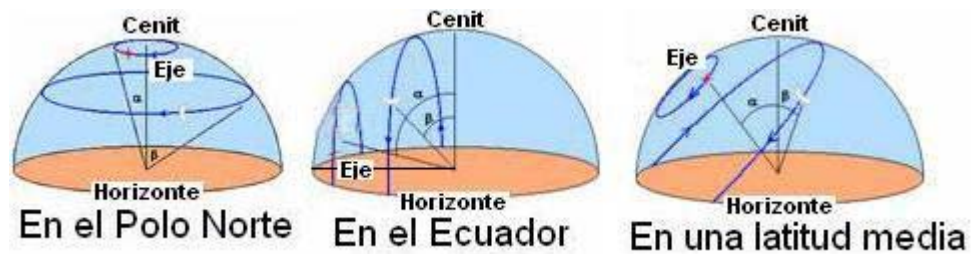


Figura 7 Variación del cielo, según la latitud.

Fuente: <http://en.wikipedia.org/wiki/Rotation#Astronomy>

Sistemas de coordenadas astronómicas

Así como en la cartografía se usan diferentes sistemas de coordenadas para referenciar cualquier lugar sobre la superficie terrestre, en la astronomía existen varios sistemas de coordenadas que permiten ubicar cualquier cuerpo celeste.

El uso de estos sistemas de coordenadas¹¹ es ampliamente usado tanto por profesionales como por aficionados. Los siguientes son los dos sistemas más usados.

Las coordenadas horizontales

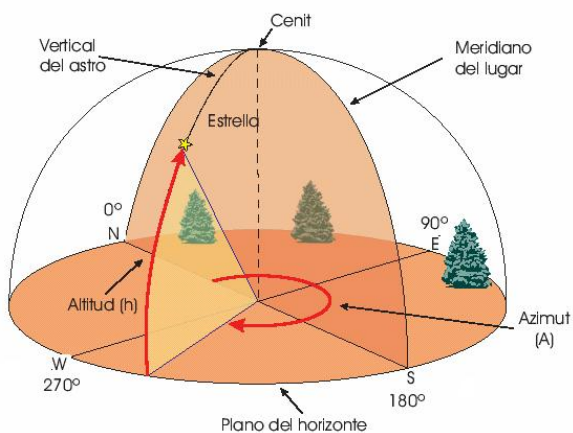


Figura 8 Sistema de coordenadas horizontales.

Fuente: <http://www.astrored.org/iniciacion/curso/1.html>

¹¹ [1] Es una excelente opción para ampliar más sobre el tema.

Como se ve en la figura 8, son aquellas que están referidas al horizonte del observador. El origen de coordenadas es un sistema topocéntrico cuyo eje fundamental es la vertical del lugar. El círculo fundamental es el horizonte. Los semicírculos máximos que unen el cenit con el nadir y un astro determinado se denominan círculos verticales o la vertical del astro.

Las coordenadas horizontales son: **la altura o altitud** y el **acimut**.

La altura es el ángulo vertical del astro sobre el horizonte, comprendido entre el horizonte del lugar y el centro del astro; se mide de 0° a 90° a partir del horizonte y tiene signo positivo para los astros situados por encima del horizonte y signo negativo para los situados por debajo del mismo; se representa por la letra **h** (Véase la figura 8).

También se usa, en vez de la altura, la distancia cenital, que es el ángulo vertical comprendido entre el cenit y el centro del astro. Se representa por **Z** y se relaciona con la altura por medio de la siguiente ecuación:

$$h = 90 - z \quad (4)$$

El acimut es el arco medido sobre el horizonte, desde el norte en dirección hacia el oriente, hasta llegar a la vertical del astro. Su valor va de 0° a 360° y se representa por la letra **A** o **a**. (Véase la figura 8).

En el sistema de coordenadas horizontales, la altitud y el acimut de los astros varían por la rotación terrestre y según el horizonte del observador, es decir que para dos observadores en sitios diferentes y a la misma hora, un mismo astro posee dos coordenadas horizontales diferentes.

Estos ejes de coordenadas son los que se corresponden con los ejes de rotación de los telescopios con montura acimutal.

Coordenadas ecuatoriales absolutas

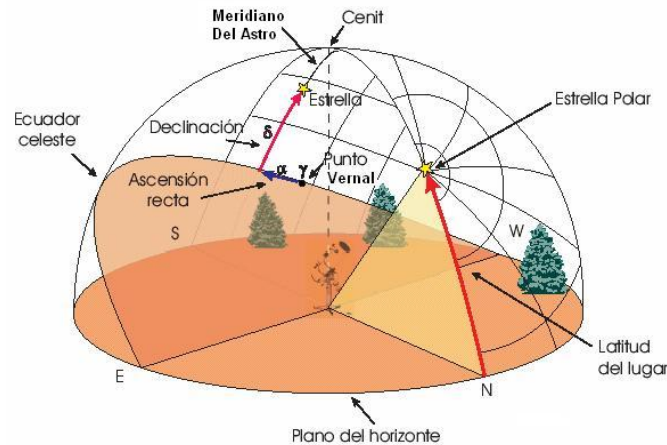


Figura 9 Sistema de coordenadas ecuatoriales.

Fuente: <http://www.astrored.org/iniciacion/curso/1.html>

Las coordenadas ecuatoriales absolutas son aquellas que están referidas al ecuador celeste. El eje fundamental es el eje del mundo, que corta a la esfera celeste en dos puntos llamados polos. El plano fundamental es el ecuador celeste y los círculos menores paralelos al mismo son los paralelos celestes o círculos diurnos de declinación. Los ejes principales son: la **declinación** y la **ascensión recta**.

La declinación: es el arco medido sobre el meridiano del astro, entre el ecuador celeste y el centro del astro, va de 0° a 90° para declinaciones al norte del ecuador y de 0° a -90° para declinaciones al sur del ecuador; se representa por **dec** (Véase la figura 9).

La ascensión recta: es el arco medido sobre el ecuador celeste desde del punto vernal hasta el meridiano que contiene el astro en dirección hacia el este. Varía de 0 horas a 24 horas y se representa por **A.R.** o **α** . (Véase la figura 9).

Estas coordenadas son universales ya que no dependen ni del lugar, ni de la hora de la observación, por esto son las más utilizadas¹², se encuentran en todos los catálogos astronómicos y efemérides; además se corresponden con los movimientos de rotación de las monturas ecuatoriales.

3.1.2.2 Catálogos Estelares

Al realizar un estudio sistemático del cielo, se hace necesario el uso de algún tipo de base de datos, la cual contenga información básica de las estrellas y demás cuerpos celestes estudiados; esta información ha de ser fiable y con un margen de error que no supere el de los equipos de observación.

A partir de esto surgió la necesidad de agrupar dicha información en lo que hoy conocemos como catálogos estelares. Estos catálogos ya eran conocidos desde la época de Hiparco de Nicea, a quién se le atribuye la creación del primer catálogo estelar del que se tenga conocimiento.

Tuvieron que pasar varios siglos hasta que se lograron conformar catálogos bastante completos, los cuales fueron posibles gracias a la invención del telescopio y del importante trabajo realizado por astrónomos como Charles Messier (1730-1817), Johannes Bayer (1572-1625) y Friedrich Argelander (1799-1875), entre otros.

Actualmente agencias espaciales como la NASA y la ESA realizan esfuerzos en conjunto e invierten millones de dólares en la creación de catálogos estelares, como el Hiparcos que contiene la información astrométrica y fotométrica de 118209 estrellas o el Tycho que contiene la información de 2.5 millones de estrellas.

¹² Aunque existen varias fórmulas matemáticas para la conversión entre los sistemas de coordenadas.

El uso de los catálogos estelares es muy importante, ya que permite conocer información básica de las estrellas como sus coordenadas, magnitudes estelares, distancias y clasificaciones entre otras cosas.

Hay que tener en cuenta que los datos de los catálogos estelares deben ser referidos a una fecha y han de poseer un factor de corrección, pues debido a los movimientos propios de las estrellas, estos deben ser corregidos y actualizados.

3.1.3 Astrometría

Rama de la astronomía de posición que se encarga del estudio de las posiciones y movimientos de los cuerpos celestes.

3.1.3.1 Determinación de las coordenadas

Una de las principales fuentes de estudio en la astrometría es la determinación de las coordenadas astronómicas de un cuerpo celeste, el cual ha sido registrado en una fotografía, placa fotográfica o en formato digital por un sensor CCD/CMOS. Para conocer estas coordenadas, se necesitan superar dos situaciones:

- Determinar el centro del objeto, el cual abarcará parte de la superficie de la fotografía o ciertos píxeles de la imagen.
- Referir las coordenadas relativas del objeto (sobre el sensor o la fotografía) a un sistema de coordenadas universales (las Ecuatoriales son las más usadas).

Determinación del centro de un objeto

Debido a la grande distancia que nos separa de ellas, todas las estrellas, excepto el Sol, aparecen para nosotros como fuentes puntuales. Cualquier apariencia de tamaño en la imagen estelar se debe a distorsiones introducidas por la atmósfera o por las características del sistema de registro.

Cuando se determinen las coordenadas del objeto, es necesario adjudicárselas a un solo punto de toda la imagen (centroide) y no a una región o serie de píxeles. Para esto es necesario modelar la intensidad de la radiación electromagnética captada, como una función de las coordenadas (x, y) sobre el sensor.

La medida que se estime del centroide de la estrella será enormemente influenciada por la resolución del sistema, hablando en términos de un sensor CCD¹³, esta es lo que representa un píxel del sensor sobre la bóveda celeste y suele darse en segundos de arco por píxel.

El valor de la resolución del sistema se obtiene por la ecuación (5). [16]

$$\rho(" / pix) = 206.265 \frac{T(\mu m)}{f(mm)} \quad (5)$$

Donde

ρ = resolución en segundos de arco por píxel (" / pix).

T = tamaño del píxel en μm

f = Distancia focal efectiva del sistema en mm

Existen varios métodos para determinar el centroide de una estrella, estos son:

- **Píxel de mayor intensidad**

Este método es el más simple e impreciso de todos, consiste en adjudicar el centroide al píxel que registre el mayor nivel de intensidad. Tiene en contra que solo se alcanza el ½ píxel en resolución.

- **Ajuste bidimensional**

Aprovechando el hecho de que la intensidad es función de las coordenadas (x,y) sobre la imagen, se suele ajustar este nivel de intensidad a una curva gaussiana, la cual idealmente posee su máximo hacia el centro de la región.

¹³ Y en general para cualquier sistema de captura.

Dentro del cálculo de centroides en [11] son presentados dos procedimientos básicos, sobre los cuales se han desarrollado las diferentes variaciones. Estos son:

- **El centro de masas**

Si un objeto en la imagen se define por la función $B(x,y)$, entonces, por el teorema de Papoulus [12], el $(K+L)$ orden de esta función es

$$B_{KL} = \sum_x \sum_y x^K y^L B(x, y) \quad (6)$$

La intensidad total de la imagen está dada por B_{00} y se puede asumir como la “masa” total de la imagen, entonces cada punto de la función $B(x,y)$ se puede asumir como un elemento infinitesimal de “masa” de la imagen, para el cual es fácil determinar el centro de masas. Este se halla mediante B_{10} y B_{01} , que se definen como:

$$\begin{aligned} B_{10} &= \sum_x \sum_y x B(x, y) / B_{00} \\ B_{01} &= \sum_x \sum_y y B(x, y) / B_{00} \end{aligned} \quad (7)$$

- **Ajuste de la PSF¹⁴**

Todas las imágenes de estrellas, registradas con un CCD, poseen una distorsión que se debe exclusivamente a la óptica de la cámara. Esta distorsión tiene la misma forma, pero difiere en intensidad, escala y posición.

Ajustando la PSF a un conjunto de imágenes, se obtienen las magnitudes relativas (m).

$$m = z_{pt} - 2.5 \text{Log}(Factor_de_escala) \quad (8)$$

¹⁴ La PSF o *Point Spread Function*, es la respuesta al impulso de cualquier sistema óptico.

Donde z_{pt} es la magnitud asignada a la PSF. Diferentes curvas matemáticas son ajustadas a los datos hasta obtener un ajuste satisfactorio, se determinan la posición y la escala.

Al fotografiar una estrella, la distribución de intensidades que se registra en el sensor, posee una forma que se puede aproximar a una curva Gaussiana, la cual se define como

$$I(r) = I(0)e^{\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (9)$$

Con r = radio respecto al centro de la imagen.

σ = parámetro que caracteriza a la distribución de las estrellas en la imagen.

$I(0)$ = máximo de intensidad.

La linealización de la ecuación (9) produce

$$\ln I(r) = \ln I(0) + br^2 \quad (10)$$

Que posee la forma $Y = A + BX$. Los coeficientes A, B se obtienen por regresiones

lineales de los datos (x,y) y $b = -\frac{1}{2\sigma^2}$.

Ahora, r se expresa en términos de las coordenadas (x,y)

$$r_i^2 = (x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 \quad (11)$$

Donde (x_0, y_0) son las coordenadas del centroide.

Reemplazando (11) en (10) se obtiene

$$\text{Ln } I(r) - \text{Ln } I(0) = b[(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2] \quad (12)$$

Resolviendo (12) se llega a una expresión que posee la forma

$$E_i = C_0 + C_1 X_i + C_2 Y_i + C_3 X_i^2 + C_4 Y_i^2 \quad (13)$$

Donde los coeficientes C_0, C_1, C_2, C_3 y C_4 se calculan por mínimos cuadrados $E_i = \text{Ln } I(r) - \text{Ln } I(0)$, i = número del píxel y (x_i, y_i) son las coordenadas del píxel.

Realizando las derivadas parciales de (13) respecto a X y a Y se llega a:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial x} &= c_1 + 2c_3 X = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial y} &= c_2 + 2c_4 Y = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

Reemplazando en (14), para el caso donde $X=X_0$ y $Y=Y_0$, se llega a:

$$x_0 = -\frac{c_1}{2c_3} \quad y_0 = -\frac{c_2}{2c_4} \quad (15)$$

Que corresponden a las coordenadas (x,y) del centroide de la estrella.

Coordenadas estándar y constantes de placa

Como ya se explicó, la primera parte del proceso de identificación de un campo estelar consiste en el cálculo de los centroides de todas las estrellas en la imagen, ahora se debe determinar la relación existente entre las coordenadas (x,y) de los píxeles en la imagen, con las coordenadas de AR y DEC de las estrellas

registradas. A continuación se describe un método que es presentado en [17] y en [32], el cual permite llegar a esta relación.

Para obtener las coordenadas hay que considerar que en la práctica se está tomando un registro de un objeto esférico (el cielo) sobre un plano (sensor CCD), teniendo presente estas consideraciones geométricas y además haciendo uso de la astronomía de posición y la trigonometría esférica, se llega a una función que relaciona los dos sistemas de coordenadas.

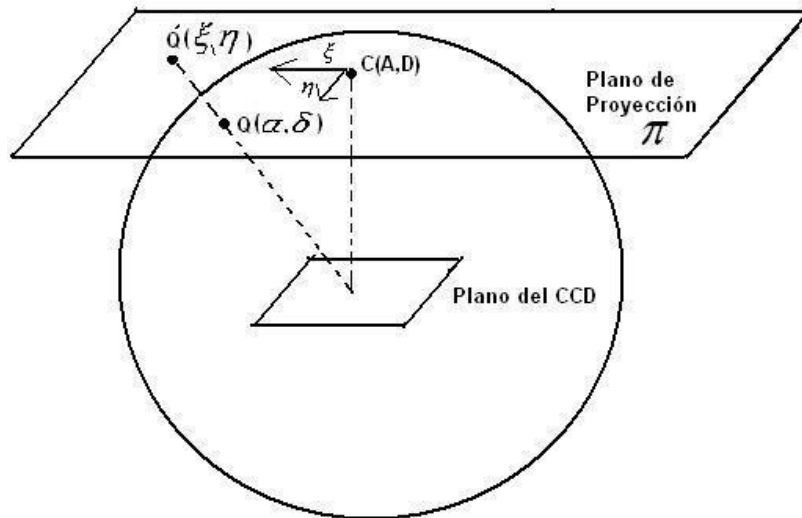


Figura 10 Proyecciones sobre el plano tangente.

Fuente: Autores.

Como se aprecia en la figura 10, para un observador cualquiera, cuyo eje óptico apunta hacia la estrella C de coordenadas ecuatoriales (A,D), π es el plano tangente a la esfera celeste en el punto C. El radio de la esfera se asume igual a la distancia focal (F) del sistema óptico.

En este modelo se considera al plano π paralelo al plano del CCD y sobre el cual se trazan los ejes coordenados (ξ, η) , desde el punto C, $C\eta$ en dirección norte y $C\xi$ en dirección este.

Ahora se toma otra estrella dentro del campo de visión del sensor, la cual se denomina $Q(\alpha, \delta)$, de coordenadas AR= α y Dec= δ . La estrella Q se proyecta en el plano π como el punto $Q'(\xi, \eta)$ (Véase la figura 10).

Esta proyección se realiza a todas las estrellas y cada una adquiere una coordenada (ξ, η) , el nuevo sistema de coordenadas (ξ, η) recibe el nombre de **coordenadas estándar**. El objetivo es encontrar la relación entre las coordenadas estándar (ξ, η) y las coordenadas ecuatoriales (α, δ) .

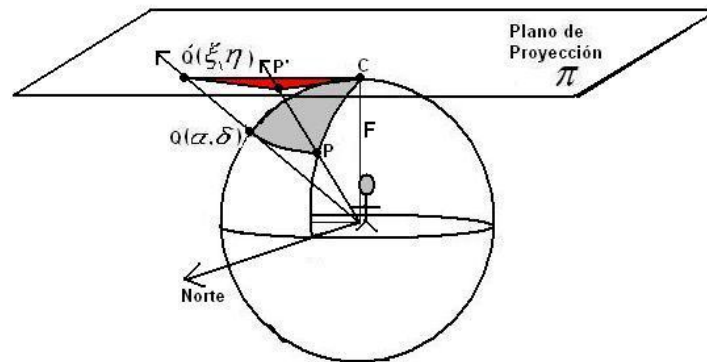


Figura 11 Proyección de la estrella polar sobre el plano tangente.

Fuente: Autores

Ahora se procede a ubicar sobre la esfera celeste la estrella polar (P) y su respectiva proyección (P') sobre el plano π , tal como se aprecia en la figura 11, con este punto se forman el triángulo esférico (PQC) que es formado por la estrella polar, el centro del sensor y el punto Q.

La proyección en π del triángulo PQC es (P'Q'C), que es un triángulo plano. La medida del ángulo esférico (PCQ) es igual a la del ángulo plano (P'CQ') y recibe el nombre de γ . El arco CQ recibe el nombre de ϵ . Mediante las ecuaciones (1), (2) y (3), se puede resolver el triángulo esférico QCP (Véase la figura 12).

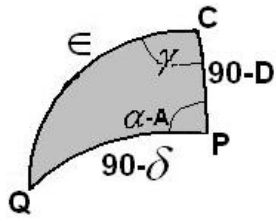


Figura 12 Triángulo esférico

Fuente: Autores.

En la figura 13 se muestra una vista del plano π , con base en los resultados obtenidos, se determinan las coordenadas (ξ, η) para el punto Q' (13).

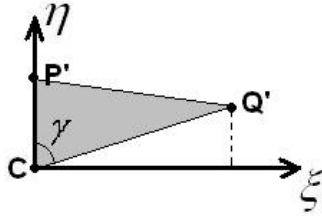


Figura 13 Vista superior del plano π

Fuente: Autores.

$$\begin{aligned} Q'_\xi &= CQ' \text{sen}(\gamma) \\ Q'_\eta &= CQ' \text{cos}(\gamma) \end{aligned} \quad (16)$$

De la figuras 11 y 12 se deduce que

$$CQ' = F \tan(\epsilon) \quad (17)$$

Lo cual permite expresar las coordenadas estándar en términos de la distancia focal:

$$Q'(\xi, \eta) = (CQ' \text{sen}(\gamma), CQ' \text{cos}(\gamma)) = (\tan(\epsilon) \text{sen}(\gamma), \tan(\epsilon) \text{cos}(\gamma)) \quad (18)$$

De la figura 12 y utilizando las ecuaciones (1), (2) y (3), se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\cos(\epsilon) = \text{sen}(\delta)\text{sen}(D) + \cos(\delta)\cos(D)\cos(\alpha - A) \quad (19)$$

$$\tan(\gamma) = \frac{\text{sen}(\alpha - A)}{\cos(D)\tan(\delta) - \text{sen}(D)\cos(\alpha - A)} \quad (20)$$

Que conducen a

$$\tan(\epsilon) = \frac{\cos(D)}{\text{sen}(D)\cos(\gamma) + \cot(\alpha - A)\text{sen}(\gamma)} \quad (21)$$

Multiplicando (21) por $\text{sen}(\gamma)$ y utilizando (19), mediante un simple despeje algebraico, se llega a una nueva expresión para las coordenadas estándar:

$$\xi = \tan(\epsilon)\text{sen}(\gamma) = \frac{\text{sen}(\alpha - A)}{\cos(D)\tan(\delta) - \cos(D)\cos(\alpha - A)} \quad (22)$$

$$\eta = \tan(\epsilon)\cos(\gamma) = \frac{\tan(\delta) - \tan(D)\cos(\alpha - A)}{\tan(D)\tan(\delta) + \cos(\alpha - A)} \quad (23)$$

Despejando (22) y (23), se llega a una expresión, la cual permite hallar la ascensión recta y la declinación de un cuerpo en términos de la distancia focal del instrumento y las coordenadas estándar del cuerpo celeste, las cuales son:

$$\tan(\alpha - A) = \frac{\xi}{\cos(D) - \eta\text{sen}(D)} \quad (24)$$

$$\tan(\delta) = \frac{(\eta\cos(D) + \text{sen}(D)\text{sen}(\alpha - A))}{\xi} \quad (25)$$

Que corresponden a la relación que se estaba buscando en un principio. En este punto se pensaría que el problema está resuelto, pero desafortunadamente se desconocen las direcciones de los ejes (ξ, η) en la placa y la distancia focal efectiva (factor que varía con la temperatura), además no se ha considerado el hecho de que las coordenadas estándar no son las coordenadas que se registran en la placa.

Para solucionar esto, se debe hallar una relación entre las coordenadas estándar y las coordenadas (x,y). Este nuevo sistema de coordenadas (x,y) hace referencia a la posición, sobre el sensor, de los centroides de las estrellas, está referido respecto a dos ejes cartesianos y recibe el nombre de **coordenadas de medida**.

Para hallar la relación entre las coordenadas de medida y las estándar, de alguna forma se debe llegar al conocimiento de las coordenadas (α, δ) y (x,y) de por lo menos 3 estrellas presentes en la imagen, las cuales reciben el nombre de **estrellas guía**.

Considerando que los ejes X,Y se encuentran rotados y escalados de una forma indeterminada respecto a los ejes ξ, η y aún sin conocer cuales sean las condiciones, la relación entre los dos sistemas siempre se podrá aproximar por lo menos de forma lineal como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned}\xi &= ax + by + c \\ \eta &= dx + ey + f\end{aligned}\quad (26)$$

Donde, las constantes a, b, c, d, e, f se denominan las **constantes de placa** y dependen de factores externos, las constantes (a) y (d) relacionan el desfase entre el centro de la placa, el eje óptico del sistema y el plano tangente, por otro lado (b) y (e) están asociadas con los factores de escala en los ejes X y Y respectivamente, mientras que (c) y (f) se relacionan con las direcciones de los ejes X y Y respecto al ecuador terrestre y la dirección del polo norte celeste.

El método más sencillo de calcular el valor de las constantes de placa es por un **ajuste de mínimos cuadrados**; para hacerlo se deben conocer las coordenadas de AR y Dec, junto con las coordenadas X, Y para un grupo mínimo de 3

estrellas¹⁵ que estén sobre la imagen, entre más estrellas de referencia se tengan, mejor será el ajuste.

En esta solución no se han tenido en cuenta factores como la refracción, aberraciones ópticas, paralaje entre otras fuentes de error. Si se quiere realizar un modelo más preciso, se han de considerar estos tópicos¹⁶, los cuales hacen variar la ecuación 23 por un modelo no lineal de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\xi &= ax^2 + 2hxy + by^2 + 2gx + 2fy + c \\ \eta &= a'x^2 + 2h'xy + b'y^2 + 2g'x + 2f'y + c'\end{aligned}\quad (27)$$

Las constantes de placa ahora son 6 y se necesitan mínimo 6 estrellas para poder determinarlas por el mismo ajuste de mínimos cuadrados.

Finalmente se han obtenido las relaciones que permiten convertir las coordenadas de medida a coordenadas estándar, las cuales junto con la determinación de la focal del sistema, la identificación plena de por lo menos 3 estrellas guía y el centro del sensor, permiten conocer las coordenadas de AR y Dec para cualquier punto sobre la imagen.

3.2 Sistemas de observación

3.2.1 Telescopios

El telescopio astronómico es un instrumento óptico que permite la observación de cuerpos celestes, bastante alejados del observador y por ende poco luminosos.

¹⁵ Esto debido a que son 3 las incógnitas (por ecuación) a hallar.

¹⁶ En [17] se hace un análisis completo sobre estas consideraciones.

La función principal de los telescopios es captar la luz procedente de los objetos conduciéndola después hacia un ocular, placa fotográfica o cualquier otro tipo de dispositivo, para su observación, registro y/o estudio. Permite captar más información y apreciar más detalles de lo que le es posible al ojo humano¹⁷; este poder aumenta al incrementar la abertura o diámetro del objetivo.

3.2.1.1 Conceptos básicos de óptica

Lente: pieza de vidrio u otro material cristalino, la cual trabajada de forma apropiada y permite la obtención de imágenes por efecto de los fenómenos de refracción.

Espejo: superficie límite de un medio en la que se produce la reflexión de la luz.

Foco (f): punto en el que los rayos de luz convergen al refractarse en una lente o reflejarse en un espejo. El foco de toda lente o espejo se sitúa en algún punto de la recta de su eje.

Distancia focal (F): la distancia que media entre el centro del objetivo (lente o espejo) y el punto donde los rayos de luz convergen, es decir, el foco. Esta distancia depende de la curvatura de las lentes o espejos. (Véase la figura 14).

Objetivo: elemento de un instrumento óptico dispuesto en dirección al objeto que se quiere observar. Los objetivos de los instrumentos ópticos son lentes o espejos y sobre ellos incide la luz proveniente de los objetos observados, refractándose en el caso de las lentes o reflejándose en el caso de los espejos. (Véase la figura 14).

Aberración óptica: distorsión producida por un sistema óptico que produce una imagen imperfecta del objeto observado. La aberración cromática se origina

¹⁷ No está de más aclarar que también existen otros tipos de telescopios, que registran longitudes de onda diferentes al espectro visible, como los telescopios de Rayos X, Gamma, infrarrojos, Radiotelescopios, etc.

cuando los rayos de luz de distinta longitud de onda no coinciden en el foco. La aberración geométrica produce imágenes distorsionadas y de poca nitidez.

Ocular: lente o sistema de lentes de un instrumento óptico y que constituye la parte donde el observador ubica su ojo. El ocular se sitúa en el foco del objetivo del instrumento, facilita y aumenta la imagen proporcionada por éste. La característica que más resalta de los oculares es que permiten variar la distancia focal del sistema que es la que, como se verá a continuación, proporciona los aumentos.

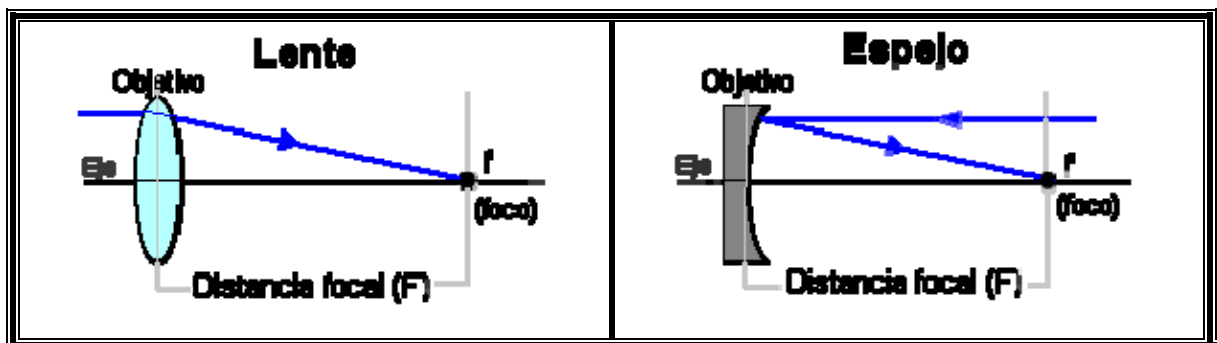


Figura 14 Formación de Imágenes en una lente y en un espejo.

Fuente: <http://www.cielosur.com>

3.2.1.2 Elementos y funcionamiento del telescopio

El telescopio es un instrumento óptico y como tal sus elementos constituyentes básicos son propios de la óptica, los telescopios pueden estar conformados por lentes, espejos o un arreglo de ambos.

En una lente la luz desvía su trayectoria al pasar a través de ella. Este es el fenómeno de la refracción, que se produce siempre que la luz pasa de un índice de refracción a otro. En los espejos la luz también cambia de dirección pero, esta vez, La reflexión es el cambio en la dirección de un rayo de luz cuando este no logra traspasar la interfaz entre dos medios.

Sea lente o espejo su función es la de concentrar en un punto próximo la luz de un objeto distante. A éste primer elemento se le denomina objetivo. La imagen real así obtenida puede ser ampliada con otra lente llamada ocular.

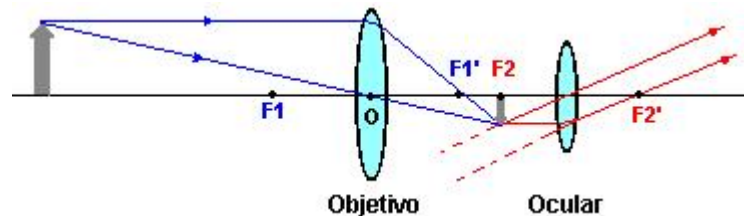


Figura 15 Funcionamiento del Telescopio.

Fuente: <http://www.cielosur.com>

Como se aprecia en la figura 15, la distancia entre el centro de la lente objetivo (punto O) y su foco (punto F1') se le llama longitud focal del telescopio. Se representa por la letra **F** y su valor suele venir expresado en milímetros.

El ocular se coloca entonces de manera que su foco (punto F2) coincida con la imagen formada por el objetivo. En esta situación el cristalino del ojo del observador forma sobre la retina una imagen invertida de igual tamaño que la formada por el objetivo, pero al originarse un gran aumento angular, se ve con mayor detalle.

Si se sustituye la lente objetivo por otra con una distancia focal diferente se comprueba que la imagen obtenida cambia, ya sea por una más grande y con menos resolución o más pequeña pero con mayor resolución¹⁸.

Sabiendo que lo que se aprecia de una estrella no es más que la luz que esta emite, se deduce que cuanto más grande sea la superficie colectora (objetivo), más detalles se percibirán.

¹⁸ Teniendo en cuenta que la cantidad de información que se recibe es la misma, habrá un límite práctico de aumentos, donde más allá simplemente se obtiene una gran mancha difusa.

Al tamaño del objetivo se le conoce con el nombre de diámetro del objetivo o apertura. Se representa con la letra **D** y su dimensión se expresa en milímetros.

3.2.1.3 Clases de telescopios

Existen dos tipos principales de telescopios: los refractores, cuya óptica está basada en el empleo de lentes y los reflectores, que usan espejos. De su combinación, surgen los catadióptricos.

REFRACTORES

- Refractor

REFLECTORES

- Reflectores NEWTONIANOS
- Reflectores CASSEGRAIN

CATADIÓPTRICOS

- SCHMIDT-NEWTON
- SCHMIDT-CASSEGRAIN

Telescopios refractores

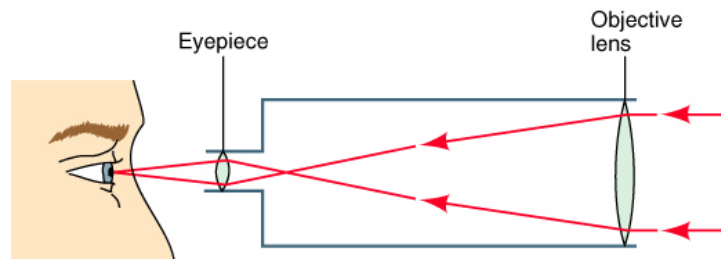


Figura 16 El telescopio refractor

Fuente: <http://burro.astr.cwru.edu/Academics/Astr201/Telescopes/telescopes.html>

En su esquema básico el objetivo de un telescopio refractor está formado por una lente ubicada en un extremo del tubo, que proyecta la luz hacia el fondo, donde se ubica el ocular a través del cual se observa. (Véase la figura 16).

Telescopios reflectores

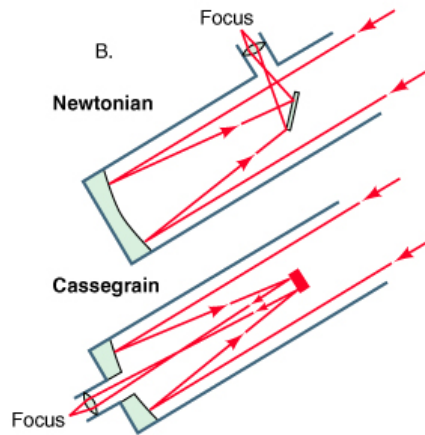


Figura 17 El telescopio reflector

Fuente: <http://burro.astr.cwru.edu/Academics/Astr201/Telescopes/telescopes.html>

Los telescopios reflectores (Véase la figura 17), utilizan como objetivo un espejo llamado primario (generalmente parabólico) ubicado al fondo del tubo óptico; la imagen se proyecta hacia un espejo secundario que la envía a su vez hacia el ocular. Al intervenir más elementos es necesario que todos estén bien alineados¹⁹.

Telescopios catadióptricos

Este tipo de telescopios emplean en su esquema óptico un sistema de lentes y espejos muy similar al de las cámaras fotográficas. Su diseño está basado en las cámaras Schmidt, en las que la luz atraviesa una lente correctora antes de reflejarse en el espejo primario.

La lente correctora tiene la función de provocar una aberración igual y contraria a la producida por los dos espejos, para así anularla.

Hay una familia de catadióptricos altamente utilizada, son los Schmidt-Cassegrain.

¹⁹ Proceso que se conoce como colimación.

Catadióptricos SCHMIDT-CASSEGRAIN

Son producto de una combinación de la cámara Schmidt y un telescopio reflector tipo Cassegrain. El espejo secundario envía la luz fuera del tubo por su parte posterior a través de un orificio practicado en el centro del espejo primario.

Sus características los hacen especialmente idóneos para la fotografía astronómica. (Véase la figura 18).

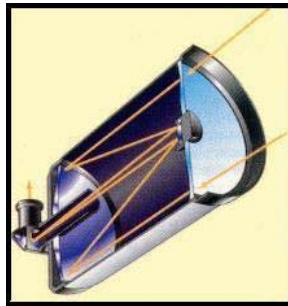


Figura 18 El telescopio Schmidt-Cassegrain

Fuente:

http://www.daviddarling.info/encyclopedia/S/SchmidtCassegrain_telescope.html

3.2.2 Monturas.

Toda la óptica del telescopio y sus accesorios (altamente sensibles a las vibraciones) descansan sobre la montura, la cual da soporte y permite apuntar el telescopio hacia el cielo. La calidad de las mediciones hechas con un telescopio depende de la estabilidad y robustez de la montura usada.

Existen dos clases principales de monturas: las altazimutales y las ecuatoriales. La montura altazimutal posee un eje paralelo y otro perpendicular al horizonte. La montura ecuatorial posee 2 ejes alineados con los planos fundamentales de las coordenadas ecuatoriales y un tercer eje que permite inclinar todo el sistema respecto al horizonte, tantos grados como sea la latitud del sitio de observación. Gracias a la disposición de sus ejes, se posibilita el seguimiento de los astros de forma más simple, contrarrestando la rotación terrestre con sólo girar alrededor del

eje de ascensión recta. Las monturas ecuatoriales más comunes son la montura alemana y la montura de horquilla (Véase la figura 19).

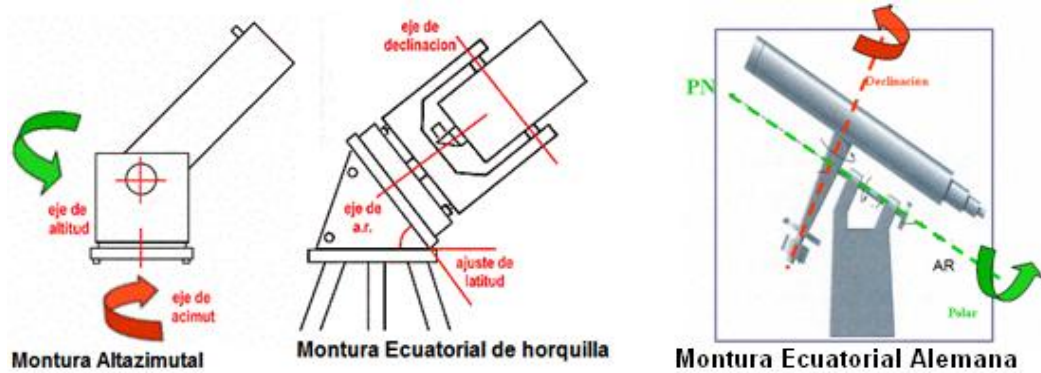


Figura 19 Diferentes tipos de monturas
Fuente: [2], Capítulo 3, RODRÍGUEZ Julián.

3.2.3 Astrofotografía

Esta disciplina, que combina la astronomía con la fotografía, ha permitido el registro de diversos cuerpos celestes, ya sea por su valor estético o científico.

La fotografía astronómica comenzó el 19 de agosto de 1839, cuando Daguerre realizó su primer intento de fotografiar el disco lunar, si bien, el resultado fue una imagen débil y borrosa, marcó el punto de partida de la astrofotografía [18].

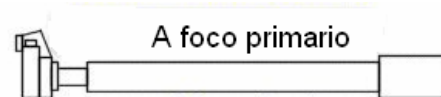
Hoy en día, gracias al constante avance tecnológico, es posible que cualquier persona con una modesta cámara pueda captar detalles en objetos tan débiles como las nebulosas, cúmulos y galaxias.

Como se verá más adelante, los dispositivos de captura utilizados para la astrofotografía permiten controlar distintas variables que intervienen en el proceso,

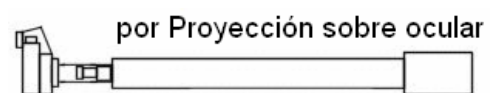
como los tiempos de exposición que pueden ir de las décimas de segundo hasta el rango de horas, lo cual supera con creces al ojo humano²⁰.

La fotografía en astronomía se suele hacer utilizando alguna de las siguientes técnicas:

Foco Primario: Utilizando el propio telescopio como si fuera un objetivo, se acopla la cámara a la óptica del telescopio (Véase la figura 20).



Por Proyección: Igual que el anterior, pero dejando puesto un ocular en el telescopio. De esta forma se consiguen más aumentos, aunque se pierde resolución.



En Paralelo o piggy-back: Este sistema consiste en acoplar la cámara en paralelo con el tubo del telescopio sin invadir la óptica del telescopio.

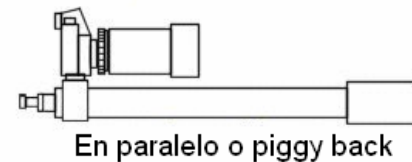


Figura 20 Técnicas de astrofotografía

Fuente: Autores.

3.3 Sistemas de automatización

La automatización comprende un conjunto de dispositivos y procedimientos que realizan el control de una planta o proceso, con una mínima o nula intervención por parte del operario.

²⁰ En donde los tiempos no son mayores a 1/10 de segundo.

En la astronomía, la automatización puede ser utilizada para facilitar la realización de tareas complejas y repetitivas, permitiendo que la toma y análisis de datos sea más ágil, cómoda y en especial eficiente.

3.3.1 Etapas de los sistemas automatizados

Las etapas presentes en un sistema automatizado son:

3.3.1.1 Medición

Esta etapa está regida por los datos obtenidos de los sensores, como lo son las imágenes capturadas o la información proveniente del encoder de un motor.

3.3.1.2 Evaluación

Es la etapa de procesamiento e interpretación de la información obtenida en la etapa de medición, para una posterior toma de decisiones de acuerdo con el análisis resultante.

3.3.1.3 Control realimentado

Operación que en presencia de perturbaciones, tiende a reducir la diferencia entre la salida de un sistema y alguna entrada de referencia y lo continúa haciendo con base en esta diferencia.

En los sistemas de control visual aplicados a la astronomía, la entrada de referencia es la imagen de una estrella guía, en un tiempo inicial T_0 , mientras que la señal de retroalimentación, es la imagen capturada en T_i , con el equipo apuntando hacia la misma dirección y luego de un tiempo ΔT , donde $T_i = T_0 + \Delta T$.

3.4 Etapas de un sistema de visión artificial

La visión artificial describe la deducción automática de la estructura y propiedades de un mundo tridimensional, posiblemente dinámico, a partir de una o varias imágenes bidimensionales de la escena.

Las imágenes monocromáticas o a color pueden ser adquiridas por una o varias cámaras, que se encuentran fijas o móviles [20].

Debido al desarrollo de los algoritmos de toma de decisiones, en la actualidad, los sistemas de visión artificial son ampliamente usados, permitiendo automatizar procesos que anteriormente resultaban difíciles o imposibles de controlar con las técnicas tradicionales.

Para lograr que estos sistemas inteligentes sean capaces de reconocer patrones que les permitan recopilar la información necesaria, se siguen una serie de etapas básicas, las cuales se muestran en la figura 21.

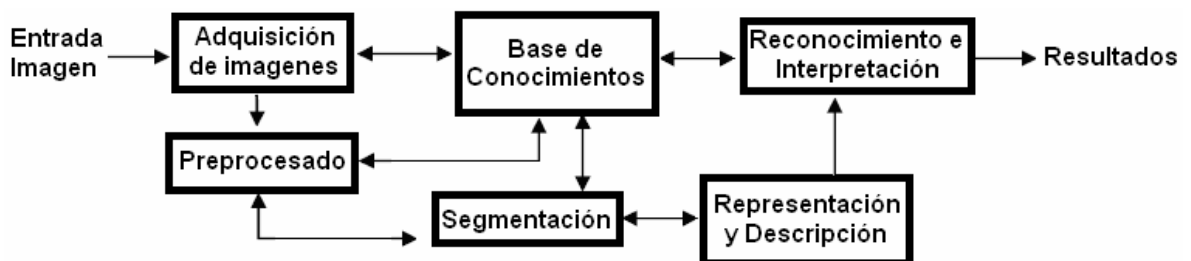


Figura 21 Etapas fundamentales de un sistema de Visión Artificial

González, Rafael y Woods, Richard. Tratamiento digital de imágenes. Estados Unidos de América, Editorial Addison-Wesley iberoamericana. 1996 [15]

3.4.1 Adquisición de imágenes:

Las imágenes y el video se transforman del mundo real al digital mediante sensores, que las convierten en señales eléctricas, las cuales son filtradas, amplificadas y digitalizadas para que puedan procesarse en el computador [19].

3.4.1.1 Sistemas de adquisición de imágenes:

- **Fotografía analógica:**

Fue el primer sistema utilizado para la astrofotografía. En él interviene una cámara que forma la imagen sobre una película fotosensible, la cual se somete a un proceso de revelado para obtener una copia sobre papel de la imagen capturada, si se requieren los datos en formato digital, se pueden obtener con un scanner.

Este tipo de fotografía presenta diferentes ventajas para la aplicación en diversos campos, sin embargo no es la solución adecuada para sistemas en los que se requiere un procesamiento inmediato; por esto, a partir de los años 80, se ha venido integrando la fotografía digital en los procesos de astrofotografía.

- **Cámaras CCD (*Charge-Coupled Device*):**

El sistema de fotografía con cámaras CCD está conformado por un sensor CCD, un lente óptico y la electrónica correspondiente.

Los sensores CCD son dispositivos basados en el efecto fotoeléctrico y poseen un arreglo de células sensibles a la luz en forma de mosaico, que reciben el nombre de **píxeles**.

El lente forma las imágenes sobre el sensor CCD, el cual es expuesto a la luz durante un tiempo, denominado **tiempo de integración**, durante este tiempo cada píxel almacena un nivel de potencial proporcional a los fotones que inciden sobre

él, una vez finaliza la integración, la señal capturada es transformada en una señal eléctrica, proporcional a la cantidad de luz incidente sobre cada píxel.

La señal eléctrica ingresa a una etapa de conversión análogo-digital. Después es enviada a un computador para su posterior procesamiento.

- **Cámaras CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*)**

Los sensores CMOS utilizan fotodiodos integrados que llevan consigo la electrónica necesaria para convertir la carga de electrones generada en una señal de voltaje, además de los circuitos de control, lectura y el conversor analógico-digital; lo cual permite que la superficie necesaria para captar la luz, sea menor que la de un CCD. [21]

Contrario a los CCD, los sensores CMOS no presentan el efecto blooming²¹, son de bajo consumo eléctrico y dado que su proceso de fabricación es menos complejo que el del CCD, son más económicos. Tienen la desventaja de contar con una mayor presencia de ruido, menores velocidades de obturación y menor rango dinámico.

3.4.2 Preprocesado:

Es la etapa en la cual la imagen a tratar es mejorada a través de la reducción de ruido, tiene por objetivo eliminar posibles fuentes de error para el análisis de la información.

Para el preprocesado de imágenes astronómicas se han desarrollado una serie de algoritmos, los cuales intentan reducir al máximo las diferentes clases de ruido presente en una imagen. Estos algoritmos requieren una serie de imágenes

²¹ contaminación entre píxeles vecinos debido a la saturación de un píxel

capturadas bajo ciertas condiciones y aplicadas al preprocesado como se ilustra en la figura 22. A continuación se explican cada una de estas imágenes y los procedimientos para su captura.

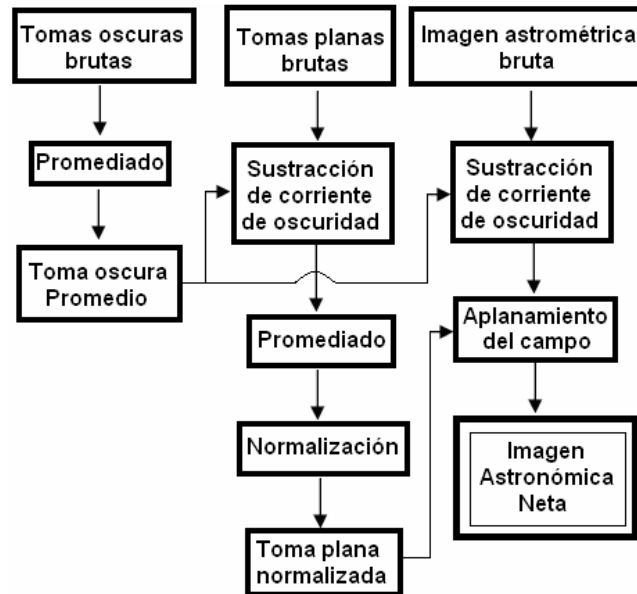


Figura 22 Esquema General del proceso de Preprocesado.

GALADÍ, David y RIBAS, Ignasi. Manual Práctico de Astronomía con CCD. Barcelona, España. Ediciones Omega S.A. 1998. [16]

3.4.2.1 Tomas oscuras brutas:

Estas tomas se realizan para disminuir el ruido térmico, llamado también *dark current*, presentes en todo dispositivo, el cual se origina debido a que la agitación térmica (propia del material) induce electrones sobre el sensor, aún sin que este haya recibido el impacto de un solo fotón. Este efecto tiene un crecimiento exponencial con la temperatura, por eso se recomienda la refrigeración del dispositivo.

Para la realización de las tomas de *dark*, se procede a cubrir totalmente el lente del sensor, de tal manera que ningún fotón incida sobre el sensor. Las capturas deben realizarse con un tiempo de exposición similar al que se va a usar para las

imágenes a registrar, como resultado, se obtendrá una imagen oscura donde se aprecian los píxeles muertos o 'puntos calientes' y el efecto propio del ruido térmico. Estos serán eliminados de la imagen por medio de una sustracción.

3.4.2.2 Tomas planas brutas:

Estas tomas son realizadas para aplanar el campo de la imagen y son necesarias, ya que a pesar de la linealidad del sensor CCD, cada detector que lo conforma se comporta de manera independiente, presentando leves variaciones en la sensibilidad. Además, este proceso reduce las imperfecciones introducidas por la acumulación de suciedad sobre la superficie del sensor y/o del lente y la variación de la luminosidad entre el centro y los bordes de la imagen, la cual es introducida por la lente.

Para este caso, se adquiere una serie de imágenes de una superficie con iluminación uniforme, la cual será utilizada para la normalización de la toma final.

Para una correcta calibración del sistema, el pre-procesamiento debe realizarse antes de cada captura, de no ser posible, se pueden realizar una serie de tomas al inicio de la sesión de trabajo y trabajar con estas para todas las imágenes, conociendo que la primera opción producirá mejores resultados.

3.4.3 Segmentación:

En esta etapa se aplican una serie de algoritmos, los cuales extraen de la imagen la información necesaria para realizar la identificación de las estrellas.

3.4.4 Representación y descripción

Este proceso toma los datos provenientes de la segmentación, con el fin de diferenciar las estrellas de los diversos elementos presentes en la escena; se utilizan características como el tamaño, forma, bordes y otras posibles opciones que el software de control evalúa para tomar las decisiones correspondientes.

3.4.5 Reconocimiento e interpretación

Las estrellas identificadas son asociadas con etiquetas, las cuales se visualizan para que el usuario pueda interpretar mejor los resultados.

3.5 Estado del arte

3.5.1 Presentación y antecedentes

El desarrollo del telescopio y el advenimiento de los diferentes dispositivos de registro y captura de imágenes trajeron consigo la necesidad de extraer y analizar la información obtenida, con un grado de precisión acorde al de los equipos existentes.

Hasta mediados del siglo XX, el trabajo que tenían que realizar los astrónomos era más duro y complicado de lo que hoy puede ser; ya que además del esfuerzo que representaba obtener una fotografía de buena calidad, debían pasar día enteros analizando las enormes placas fotográficas, realizando las diferentes tareas de astrometría y fotometría²², para así poder estimar las coordenadas del campo estelar registrado en las fotografías.

Gracias a los avances en la electrónica, fue posible abordar diferentes soluciones al problema de posicionar y controlar un telescopio, además de reducir e interpretar las imágenes que en él se registran.

Actualmente la situación ha sido llevada más allá, pues además de poder controlar los telescopios en tierra, ha surgido la necesidad de posicionar y controlar los telescopios y satélites de comunicaciones, ya sea puestos en la órbita de la Tierra

²² Rama de la astronomía que estudia el flujo o intensidad de una fuente de radiación electromagnética.

o alrededor de otro cuerpo celeste; con los niveles de confiabilidad y precisión requeridos para tan importante tarea.

Desde el punto de vista de los resultados se diferencian dos situaciones a resolver.

- Posicionar el campo de registro del sistema (ya sea telescopio o satélite), para así poder determinar las coordenadas de apuntamiento de éste.
- Controlar el sistema para que, sin importar las condiciones dinámicas que lo rodean, se mantenga apuntando hacia la región de interés durante el tiempo que sea requerido.

De la cantidad y calidad de la información que se dispone al abordar el problema, se desprende inmediatamente su complejidad. Hay situaciones en las que gracias a sensores de diferentes tipos (*encoders*, rastreadores solares, terrestres, lunares, detectores del horizonte, etc.) o por información introducida por el usuario, es posible determinar un punto de partida para la solución del problema (con un costo adicional); caso contrario es cuando se parte sin un conocimiento a priori de la situación. Este último caso se conoce como “perdido en el espacio”²³ y es la situación en la cual esta investigación se ha fundamentado.

3.5.1.1 Proceso de Apuntamiento Manual

Antes de comenzar a explicar las diferentes soluciones al problema, es necesario dejar en claro cómo es el proceso que realiza una persona que opera un telescopio²⁴, para poder apuntarlo hacia el sitio deseado y mantenerlo allí.

²³ Más conocido como *Lost In Space* en inglés.

²⁴ Con los debidos ajustes, este modelo puede explicar el control de la posición de un satélite.

En primer lugar el operario decide un sitio de interés y define unas coordenadas finales de apuntamiento, seguido de esto, acciona los movimientos del telescopio (ya sean manuales o motorizados) y hace desplazar el equipo hasta la región de interés. A continuación se realiza una verificación visual del éxito en la operación, caso contrario toma las respectivas acciones correctivas.

Para poder mantener el objetivo centrado²⁵, el operario debe realizar los ajustes, desplazando el equipo a la misma velocidad y dirección en la que se mueve, aparentemente, el cuerpo celeste.

Es importante aclarar que desde el punto de vista de los sistemas de control, el proceso es retroalimentado gracias a la intervención del operario, quien corrige los errores en la posición.

Si se desea automatizar este proceso, ya sea para comodidad del operario o por que las condiciones así lo requieren (el caso de un equipo en órbita), se deben tomar las respectivas precauciones para garantizar de alguna manera la retroalimentación al sistema, de lo contrario el error introducido a éste será acumulativo y no se podrá tener control alguno sobre el sistema. Esto es importante de entender, pues desde esta perspectiva parten las diferentes soluciones al problema de posicionar y controlar un equipo de las características ya mencionadas.

La primera respuesta dada a la problemática arriba planteada surge desde la electrónica, con el desarrollo de sistemas embebidos. Los primeros se implementaron con electrónica discreta, a los que le siguieron los basados en sistemas integrados.

²⁵ Ya sea en tierra o en el espacio, el cielo sufre un desplazamiento debido a las velocidades relativas entre el marco de referencia y las estrellas.

Las implementaciones más modernas han sido concebidas, en su mayoría, gracias a la creación y evolución de dos herramientas que hoy en día son muy comunes y altamente tecnificadas, estas son las cámaras digitales²⁶ y los computadores; herramientas que junto con el procesamiento digital de imágenes permiten formar un híbrido que se conoce como el **sensor estelar**, del cual se hablará con detalle más adelante.

3.5.2 Soluciones existentes

Si bien desde hace poco se viene hablando de este tema, en la actualidad son muchos los grupos de investigación que se encuentran adelantando trabajos en el área, contribuyendo con importantes desarrollos en la materia [7].

Aunque son innumerables las soluciones que se han implementado, el problema aún está abierto para la discusión y sin lugar a dudas este campo será de gran desarrollo durante los próximos años.

A continuación se presenta una descripción de algunos trabajos realizados, en los cuales se abordan los problemas tratados en la tesis aquí consignada.

3.5.2.1 Sistemas de electrónica discreta

Fueron los primeros en aparecer en escena, actualmente son los usados por la mayoría de sistemas de control para telescopios comerciales [3].

Su principio básico se fundamenta en el uso de encoders para determinar la posición real del equipo, poseen toda la electrónica necesaria para digitalizar los datos provenientes del encoder, los cuales junto con información básica introducida por el usuario (hora, fecha, latitud del sitio de observación, etc.), permiten establecer la hora sideral, para así solucionar complejas ecuaciones

²⁶ Ya sean de tecnología CCD o CMOS.

(Véase [1] y [4]) y obtener un pleno conocimiento de las coordenadas astronómicas de los cuerpos visibles en ese instante.

Estos sistemas poseen una subdivisión establecida por el tipo de encoder implementado

- **Encoder Absoluto:** Entrega la posición con una precisión del orden de 5 minutos de arco [3], para aplicaciones con CCD, el sistema debe hacer correcciones en la posición.
- **Encoder Diferencial:** Requieren de mayor capacidad de procesamiento, pero debido a su bajo costo y mayor resolución (cercana a 1 segundo de arco) son los más usados²⁷, presentan un error acumulativo, lo cual se traduce en la disminución de la precisión hasta alcanzar el minuto de arco.

Si bien estos sistemas son retroalimentados por el encoder, siempre permanece la incertidumbre en determinar si se llegó al objetivo, esto se hace crítico para equipos donde hay problemas de estabilidad (monturas inestables).

3.5.2.2 Sistemas híbridos de óptica y electrónica

La búsqueda de un sistema que permita un grado de incertidumbre mínimo ha redireccionado las investigaciones en el área hacia el procesamiento digital de imágenes, un campo que hoy por hoy se encuentra en alto grado de desarrollo y sobre el cual se ha trabajado en esta investigación.

Como ya se ha mencionado, las soluciones propuestas por los investigadores que han trabajado en este tema han sido diversas y con variados niveles de complejidad en sus diseños. Pese a esta prolífera situación, se puede aseverar

²⁷ El telescopio Meade LX-90 también los posee.

que actualmente los sistemas de posicionamiento que utilizan el procesamiento de imágenes poseen dos componentes principales [5]:

- **Hardware:** Conformado por sistemas ópticos (lentes) y sensores para el registro de imágenes (CCD, CMOS) o sistemas híbridos (MOEMS²⁸) capaces de detectar y capturar imágenes de campos estelares.
- **Software:** Conjunto de algoritmos con los que se obtiene una plena identificación de las estrellas registradas en la imagen. Permite además, realizar el seguimiento a un cuerpo celeste, todo con la fiabilidad que le entrega al sistema la retroalimentación dada por la imagen.

El procedimiento para realizar la identificación de las coordenadas de apuntamiento sufre variaciones en cada implementación, pero al revisar el estado del arte, se pueden distinguir unos lineamientos claramente establecidos.

La primera parte del proceso de identificación es la adquisición de una imagen del campo estelar a identificar, para esto se recurre al sensor estelar, el cual entrega una imagen. Esta imagen debe ser tratada por el software para minimizar los efectos del ruido en los cálculos que se hagan posteriormente.

El siguiente paso es realizado por el software, el cual interpreta la imagen, reconociendo cuales objetos son estrellas y cuales no, además halla los centroides de las estrellas, estableciendo una serie de relaciones geométricas entre estos, las cuales son comparadas con las obtenidas de algún catálogo estelar [6].

Finalmente, se extraen del catálogo las coordenadas de las estrellas que satisfacen las relaciones geométricas y se asignan a los respectivos centroides en

²⁸ *Micro-Opto-ElectroMechanical Systems.*

la imagen. Conocidas las coordenadas de las estrellas en la imagen, se pueden aplicar una serie de transformaciones para determinar las coordenadas de cualquier punto sobre esta.

3.5.2.3 Actualidad de los sensores estelares

La simplificación es la tendencia lógica en la automatización de todo proceso, al hablar de esto se hace referencia a la reducción, al mínimo, en el uso de componentes en el sistema y a la integración de todos estos componentes en dispositivos que cada vez sean más pequeños, con menor consumo de potencia y con una relación beneficio/costo mayor. Por otra parte, también es necesario diseñar de acuerdo al medio donde se va a implementar la aplicación. No se tendrán las mismas consideraciones para un sistema destinado a ser usado en tierra, que para uno que se ubicará en el espacio.

Para equipos en tierra, los parámetros de diseño suelen ser más flexibles de lo que se puede permitir para un equipo en órbita; donde el costo para mantener equipos voluminosos y con elevados consumos de potencia, los hace imposible de contemplar.

Pensando en los factores arriba mencionados, en [8] se hace una modificación al sensor estelar, removiendo el sistema de lentes, e implementando el clásico modelo de la cámara de agujerito, en el cual la imagen se forma sobre el sensor, al hacer un pequeño hueco sobre una superficie que lo cubre por completo.

Este modelo reduce drásticamente el volumen y peso, pero al desechar el lente, se disminuye la sensibilidad del sistema, limitándolo. Gracias a modificaciones en los algoritmos, los autores de [8] aseguran la viabilidad del proyecto, el cual tiene también a favor un campo visual amplio (30°).

El problema del campo (que se analizará más adelante) es bastante complejo y se resume en que a medida que este aumenta, aumenta la probabilidad de encontrar más estrellas y con esto la probabilidad de acierto, pero a cambio, también se reduce la resolución del sistema, luego el diseñador debe hacer un juego entre estos dos factores.

El asunto del campo trae consigo varias modificaciones al diseño original. En [8], los autores han concebido un sensor estelar de dos cámaras, esto lo hacen buscando un mayor grado de libertad en la operación del equipo ubicado en órbita. La redundancia en el sistema garantiza el poder sortear situaciones donde el campo del sensor es bloqueado, ya sea por la luz del sol o por la superficie terrestre. Para lograrlo, diseñaron un algoritmo más robusto, teniendo presente que ahora son dos cámaras las que hay que controlar y mantener.

Si bien, los autores aseguran que los bajos consumos de potencia y pesos de las cámaras implementadas no afectan el rendimiento de la propuesta; en [9] se consiguió optimizar el uso de múltiples campos de visión (FOV) al conseguir que, por medio de sistemas ópticos, las imágenes de 3 campos ortogonales incidiesen sobre un solo sensor CCD.

En primera instancia esta propuesta pareciese no tener mucho sentido, pues dentro de una misma imagen se están mezclando 3 campos diferentes, pero los autores muestran que al poseer la información completa de sus componentes ópticos, se puede conseguir la PSF para cada lente. Con esta función y con el desarrollo de algoritmos es posible diferenciar la procedencia de cada componente de la imagen y así separar la información de cada una de las 3 imágenes. Los autores hacen referencia a una implementación del sistema, que será instalada en la ISS²⁹.

²⁹ *International Space Station*

Como en un principio se había comentado, la convergencia e integración de los sistemas de control visual apunta hacia el desarrollo de sensores cada vez más sofisticados en su diseño, esto se hace evidente en [10] donde los autores han conseguido un diseño vanguardista, el cual usa micro espejos basados en sistemas MOEMS (ver figura 23), que son dispositivos integrados que combinan en una sola pastilla de silicio un sistema óptico con dispositivos microelectrónicos, permitiendo la captura y el procesado de las imágenes.

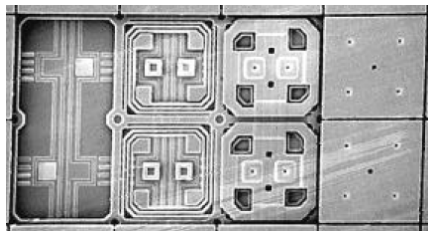


Figura 23 Detalle de un sistema MOEM

Fuente: [10]

Estos sensores, que se asemejan más a un computador de dimensiones microscópicas, poseen todas las bondades que un diseño integrado permite. Dentro de las características se destacan la reducción drástica en el tamaño y peso del sensor estelar (200 gramos), las altísimas velocidades de procesado (40 imágenes por segundo) y las bajas potencias (2 W) a las que trabajan estos dispositivos, que permiten un ahorro en el consumo energético (muy apreciado en el espacio).

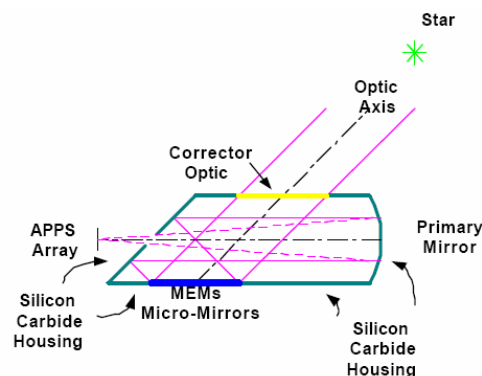


Figura 24 Disposición de los elementos ópticos y electrónicos de un sistema MOEM

Fuente: [10]

Los sensores son dispuestos, como se aprecia en la figura 24 , en la base de un encapsulado con elementos ópticos del tipo catadióptrico. En el sensor se utilizan píxeles activos con óptica adaptativa, lo que permite optimizar la captura de imágenes estelares. Junto con estos elementos, también se tiene un procesador integrado, el cual es capaz de manejar todos los procesos (captura, identificación, seguimiento) y contiene, dentro de otras cosas, un DSP de altísimas prestaciones.

3.5.2.4 Actualidad de los algoritmos de identificación

Una vez es adquirida la imagen por el sensor estelar, esta es interpretada por parte del software, distinguiéndose dos procesos, los cuales son el cálculo de los centroides de las estrellas presentes en la imagen y la identificación de las estrellas a partir de la información recolectada.

Existen muchas variaciones de los métodos mostrados en la sección 3.1.3, como el presentado en [13], que hace uso de un método denominado de “centroide predictivo”, en el cual el autor hace uso de un histórico de las imágenes, para así determinar la velocidad y ruta de los centroides sobre el sensor CCD; con base en esta información desarrolló un algoritmo que permite anticipar las posiciones de los centroides, lo que se traduce en una reducción en el tiempo de procesado.

Otras técnicas desarrolladas utilizan variaciones en el uso de la PSF, como el desenfocar el lente del sensor estelar, hasta obtener un registro de forma elíptica, al que luego se le aplican máscaras para determinar los centroides. También se ha implementado el uso de lógica difusa y redes neuronales, las cuales buscan imitar los procesos realizados por el ojo y el cerebro humano en la identificación de objetos.

Finalmente, en [14], el autor propone dos métodos para realizar la identificación, en el primero de ellos hace uso de una rejilla al indexar el catálogo, no guarda directamente las distancias entre las estrellas del catálogo, sino que utiliza las

relaciones (binarizadas) entre las posiciones de las estrellas dentro de la rejilla, el resultado es una serie de matrices con unos y ceros, donde un uno significa que ahí se encuentra una estrella, mientras que el cero muestra su ausencia.

Para el segundo método, el autor propone una variación al proceso de generar relaciones geométricas entre las estrellas y compararlas con las obtenidas de un catálogo estelar.

4 DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1 Introducción

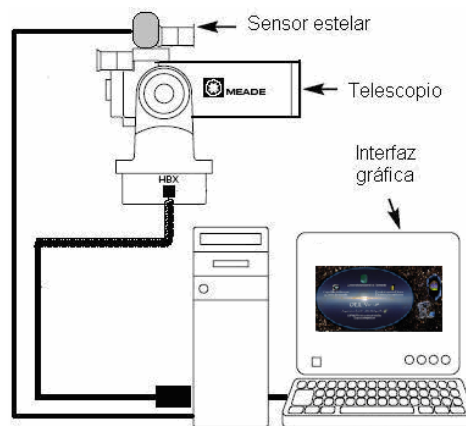


Figura 25 Esquema general del proyecto

Fuente: Autores

El prototipo (ver figura 25), resultado de esta investigación, es un sistema que está compuesto por dos componentes principales, el **sensor estelar** y el **software de control**, los cuales se detallarán a profundidad en este capítulo.

El sensor estelar es un hardware híbrido que combina elementos de óptica y electrónica, los cuales funcionan en conjunto bajo el comando de un programa principal. Este programa contiene una serie de algoritmos basados en técnicas de

astrometría y procesamiento de imágenes, encargados de realizar las rutinas de captura, pre-procesamiento de señal y reducción de las imágenes.

Los algoritmos de identificación y control se encuentran dentro del programa principal, que recibe el nombre de **Oeil 1.0**, su función es la identificación de las coordenadas ecuatoriales del campo de visión, el control visual del sistema y el control de movimiento del telescopio.

Oeil 1.0 permite la interacción hombre-máquina, ya que se encuentra implementado por medio de una interfaz gráfica que permite trabajar en 2 modos: *controlado por el usuario* y *autónomo*, brindando la posibilidad de realizar control a distancia de todo el proceso.

El lenguaje de programación escogido ha sido **Matlab® 7.0**, toda la interfaz ha sido desarrollada bajo el módulo de programación orientada a objetos **GUI**, el cual controla las subrutinas y funciones desarrolladas para realizar a cabo las tareas planteadas en el diseño. Cabe destacar que el código es abierto a futuras expansiones.

4.2 ESQUEMA GENERAL DE OEIL 1.0

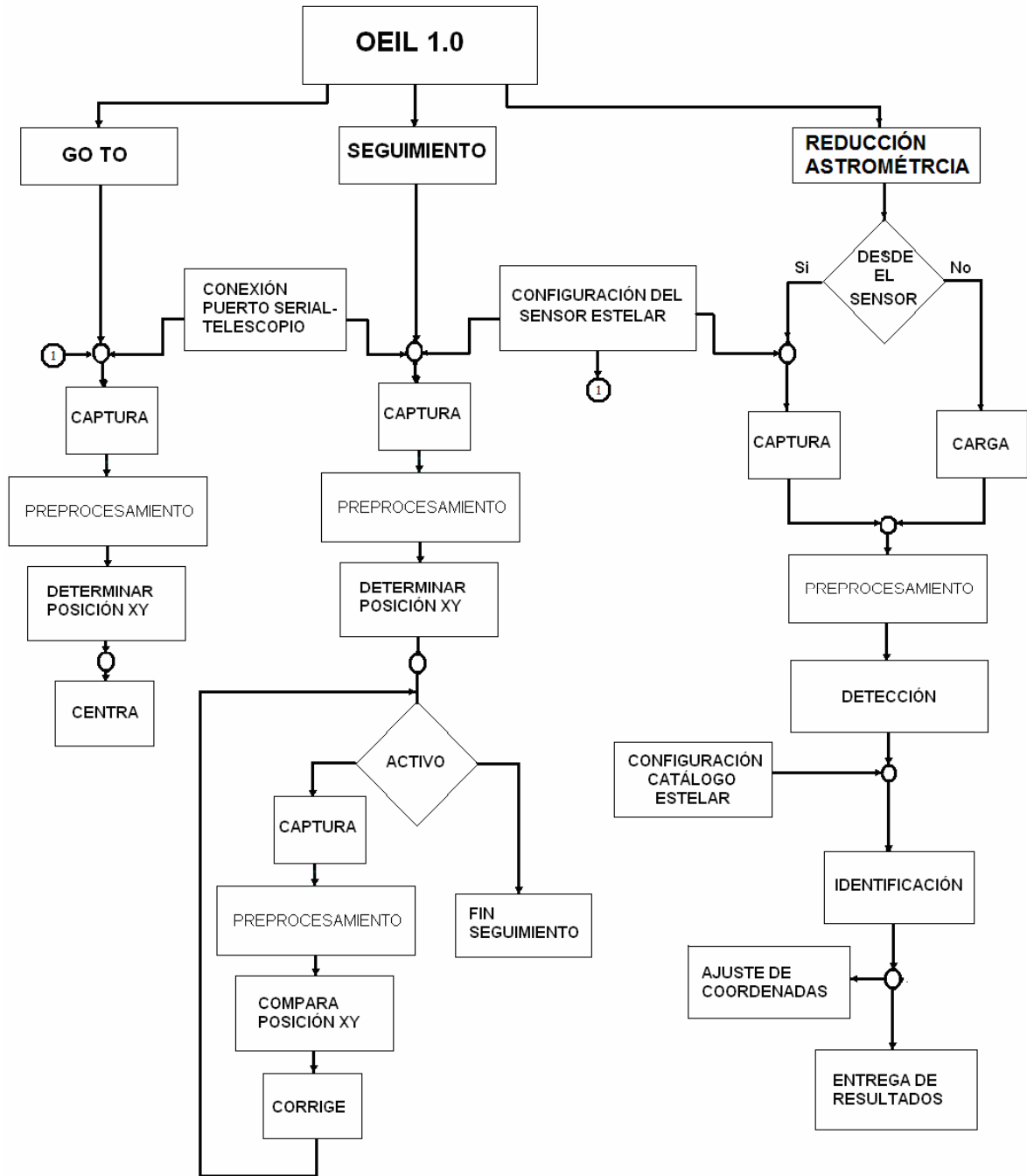


Figura 26 Diagrama general de bloques

Fuente: Autores.

En la figura 26 se puede observar la estructura general del funcionamiento de OEIL 1.0, el cual presenta tres funciones principales que son: la identificación de coordenadas o *reducción astrométrica*, seguimiento y modo GOTO, las cuales serán vistas con más detalle en el presente capítulo.

Dependiendo de cual sea el proceso a ejecutar, se hacen necesario la configuración del sensor estelar, la configuración del catálogo estelar y la conexión al telescopio, indispensables para los algoritmos implementados y controlados por el usuario por medio de la interfaz.

Tanto la función GOTO, como la reducción astrométrica, presentan una estructura similar tanto en requerimientos, como en su ejecución, pero con un control de movimiento diferente para cada una. La reducción astrométrica presenta la posibilidad de identificación desde una captura del sensor estelar, así como de imágenes de archivo, cuyas especificaciones son mencionadas más adelante.

4.3 Sistema de adquisición

4.3.1 Sensor estelar R₂D₂

4.3.1.1 Características



Figura 27 El sensor estelar R₂D₂

Fuente: Autores.

Siguiendo la estructura general mostrada, el sensor estelar R₂D₂ (Ver figura 27) fue concebido para realizar la adquisición de imágenes estelares, con las que el software de control realiza la identificación de su campo de visión, además provee la información necesaria para que el sistema realice control visual, por medio de la retroalimentación continua de las imágenes capturadas.

Como resultado final se ha alcanzado un prototipo de bajo consumo de potencia y alto desempeño, el cual será descrito a continuación.

Tabla 1, componentes del sensor estelar R₂D₂

Especificaciones	Valor o Cantidad
Peso	
Total	750 g
Total sin lente	500 g
Total sin brazo extensor ni lente	375g
Dimensiones	
Radio base	2.5 cm
Radio superior	4.5 cm
Altura	13.5cm – 17.5 cm
Rango de temperatura	
Operando	-10 hasta 55°C
No operando	-35 hasta 70°C
Voltaje de operación	5V Alimentado por el puerto USB
Consumo de corriente	
Esperando captura	max. 500 µA
Capturando	max. 100 mA
Interfaz de datos	USB 1.1
Requerimientos computacionales	Pentium II 233 MHz, RAM 32 MB, Windows 98 o superior
Componentes	
Óptica	Lente Canon 50mm. f/D 1.4
Sensor	
Tipo de sensor	CMOS
Dimensiones	3x2.5 mm
Resolución	352 (H) x 288 (V) (píxeles)
Iluminación	< 10 lux
Tamaño del píxel	8.645µm
Campo de visión (FOV)	$FOV_{hztal} = 3.487^\circ$ $FOV_{vtcal} = 2.853^\circ$
Formato de video	I420, RGB24

Refrigeración	Ducto de ventilación detrás del sensor.
Enfoque	Variable con ajuste de focal
Dispositivos de colimación	Soporte del buscador del telescopio Meade
Rendimiento	
Resolución del sistema	$35.665 \pm 0.001 ["/pix]$
Máxima magnitud estelar registrada	2.5 V
Cantidad de estrellas guía	Mínimo 3 estrellas
Frecuencia de adquisición (fps)	30
Frecuencia de identificación	1 imagen cada 2.1 ± 0.8 seg.
Frecuencia de seguimiento	1 seg.
Tamaño del catálogo estelar	5041 estrellas máximo
Magnitud máxima del catálogo	Hasta magnitud visual 6 V

Como se resume en la tabla 1, dentro de una estructura de 4.5cm X 13.5 cm y 750g de peso, está contenida toda la óptica y electrónica necesaria para capturar imágenes estelares, las cuales son enviadas hacia el software de control por medio del puerto USB 1.1.

Los diferentes componentes que conforman el sensor estelar fueron seleccionados durante las etapas de diseño, de donde finalmente se escogió como sistema óptico un lente desmontable marca Canon, de distancia focal 50mm y relación focal de 1.4 a 16; para entregar la mayor cantidad de luz al sensor, la relación focal siempre funciona en 1.4A.

El diseño incorpora un anillo para lentes de bayoneta, el cual permite intercambiar la lente por cualquier otra que utilice este sistema de ajuste. El sistema de foco del sensor es el incorporado de fábrica en el propio lente Canon.

Otra característica del diseño es la opción de variar la distancia focal, por medio del desplazamiento de la cubierta superior respecto a la base, lo cual hace

coincidir el plano focal de la lente y la superficie del sensor, el rango de trabajo es para distancias focales mínimas de 40 mm y máximas de 80 mm

Esta opción se consideró en el diseño buscando la adaptabilidad del sistema ante la posibilidad de realizar cambios futuros a su configuración, dejando abierta la opción de reemplazar la lente y/o el sensor CMOS, sin importar el fabricante.

El tipo del sensor implementado es de tecnología CMOS, de dimensiones de 3.0x2.5 mm, el cual captura imágenes de 352(H) X 288(V) píxeles. El tamaño de cada píxel es de $8.645\mu\text{m}$ con una iluminación < 10 lux. El sensor captura video RGB24 a razón de 30 cuadros por segundo, no controlable por el usuario.

El campo registrado por el sensor cubre un área del cielo de $3.487^\circ \times 2.853^\circ$, lo cual combinado con la resolución del sistema de $35.665 \pm 0.001["/\text{pix}]$, genera registros estelares de 6 a 80 píxeles, valores que dependen del brillo de la estrella y las condiciones climáticas durante la captura.

Si bien la resolución del sistema es aceptable, en la práctica se concluyó que el sensor registra estrellas de hasta magnitud 2.5, ante lo cual se recomienda elevar la sensibilidad del instrumento, para garantizar el registro de cualquier estrella del catálogo.

Gracias al balance entre el campo abarcado y la resolución del sistema, se resuelven las imágenes estelares, siempre que se puedan hallar los centroides de por lo menos 3 estrellas guía, a las que el sistema asigna las respectivas coordenadas provenientes del catálogo Hipparcos, que ha sido truncado hasta la 6ª magnitud (5041 estrellas).

4.3.2 Etapas de diseño

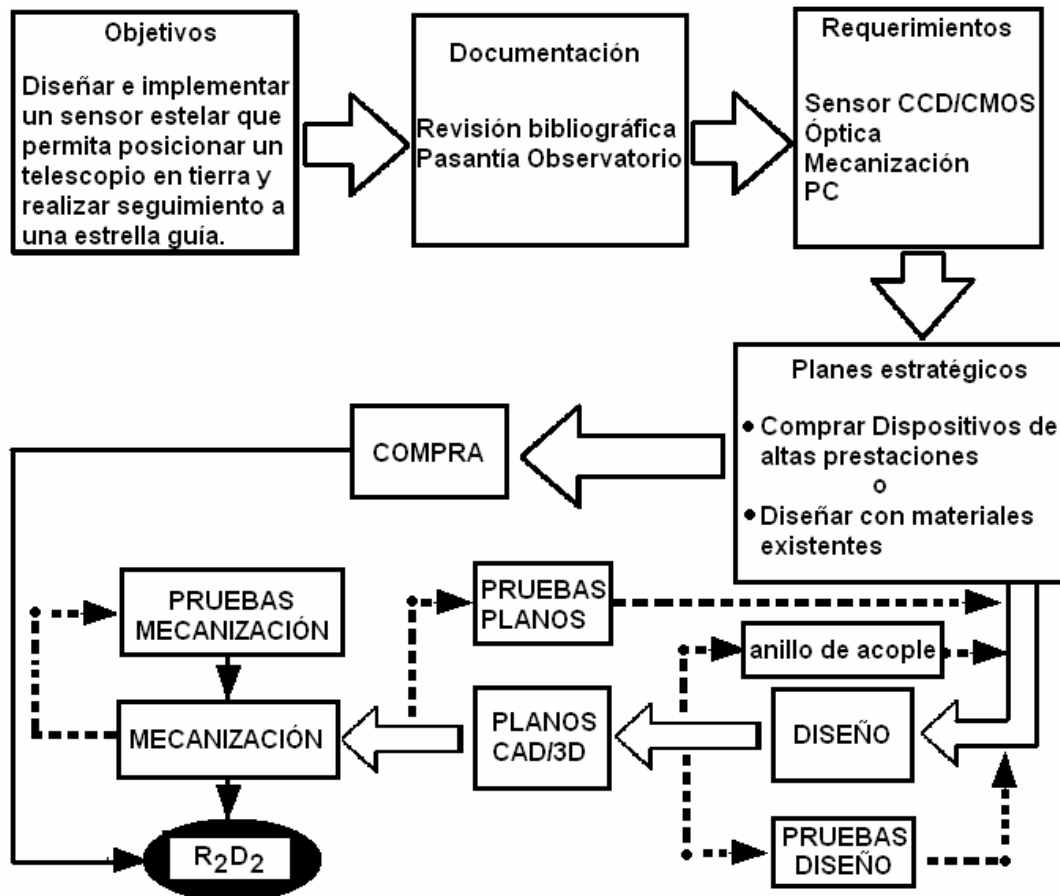


Figura 28 Etapas en el diseño del sensor R_2D_2

Fuente: Autores.

La figura 28 resume e ilustra de manera general todo el proceso de diseño del sensor estelar R_2D_2 , desde el planteamiento de los objetivos, hasta la materialización de estos con la mecanización del sensor.

Planteados los objetivos, la primera etapa que se desarrolló fue la documentación. Para esto, se hizo la revisión de la bibliografía adjuntada en la sección de referencias, la cual se fortaleció con una pasantía en el Observatorio Astronómico de la Universidad Sergio Arboleda, en Bogotá, donde se recibió una capacitación de 40 horas teóricas y 5 noches de observación, tiempo en el cual se trabajó en

diversos temas referentes a la astrometría con CCD y se adquirieron habilidades y destrezas en el manejo del telescopio principal del observatorio, las cámaras CCD y los diferentes programas con los que cuenta tan importante institución.

Al finalizar esta etapa, se alcanzó un panorama mucho más amplio de lo que es en sí un sensor estelar, se determinaron los componentes necesarios para construir uno y se comprendió el estado del arte, al estudiar el trabajo que diferentes grupos de investigación han venido realizando, desde hace algunos años, en torno a este tema³⁰.

Como resultado de la etapa de documentación, se lograron determinar los elementos principales que conforman el sensor estelar (Ver figura 26), los cuales son un sensor CMOS, que en este caso fue extraído de una *webcam*, la óptica asociada al sensor, encargada de formar las imágenes estelares sobre la superficie del sensor y un software de control que permite al usuario operar todo el sistema³¹ desde un computador personal.

Una vez fueron determinados los componentes principales del sensor estelar, se diseñaron diferentes planes estratégicos que permitieron materializar el prototipo diseñado.

Estos planes comprendieron dos rutas posibles; la primera consistió en realizar un estudio dentro del mercado de lentes y sensores CCD/CMOS, con el cual se buscó una serie de dispositivos de diferentes marcas y precios, este estudio concluyó con la elaboración de un informe (ver anexo), el cual contiene las cotizaciones, a la fecha de su realización, de los dispositivos seleccionados.

³⁰La colaboración prestada por Jorge Mejía Ph.D, investigador asociado al INPE (Brasil) y codirector de este proyecto, fue muy valiosa, gracias a su experiencia en el diseño de telescopios espaciales.

³¹ Para las pruebas, se controló el telescopio Meade LX 90, administrado por el Centro Halley.

La segunda estrategia consistió en diseñar el sensor estelar con elementos disponibles, que no requirieron una inversión elevada.

El diseñar y construir el sensor estelar se convirtió en un reto de ingeniería, ya que se obtuvo un prototipo que cumplió con las metas trazadas, con el valor agregado de la reducción a una sexta parte de los costos presentados en las cotizaciones. El precio a pagar por la implementación de este diseño fue la limitación en la sensibilidad del instrumento.

4.3.2.1 De webcam a sensor estelar

Antes de explicar las etapas realizadas en la ejecución de la segunda estrategia de diseño, es necesario conocer los dispositivos con los que se trabajó. En la tabla 2 se resume dicha información.

Tabla 2 Dispositivos utilizados en el diseño del sensor R₂D₂
Datos obtenidos de los fabricantes.

	Elemento	Referencia
Cámara		Philips Toucam Model Nr PCVC720K/17 Con lente desmontable.
Lentes		Lente Cosmicar F16mm. Adaptador tipo C. Lente Zoom Marexar-S F 80-200 mm Relación focal de 4.5-22 Adaptador tipo Bayoneta. Lente Canon F 50 mm relación focal de 1.4 - 16. Adaptador tipo Bayoneta.

El diseño con materiales existentes requirió de varias etapas, en la primera de ellas se realizó una adaptación a la cámara Philips, esta consistió en remplazar el lente original de la cámara, que para astronomía era de bajas prestaciones (F 2.6 mm), por uno con óptica de mejor calidad y mayor capacidad colectora.

Inicialmente se adaptó la lente Cosmicar F16 mm, para lograr esto, se realizaron una serie de pruebas en el laboratorio de óptica y tratamiento de señales³², las cuales permitieron calcular experimentalmente la distancia focal, la resolución del sistema y el tamaño de píxel del sensor CMOS (más adelante se detalla el procedimiento); con el valor de focal, se procedió a diseñar un anillo de acople que permitió adaptar la lente Cosmicar al cuerpo de la cámara.

La figura 29 ilustra el montaje utilizado para tomar las mediciones experimentales.

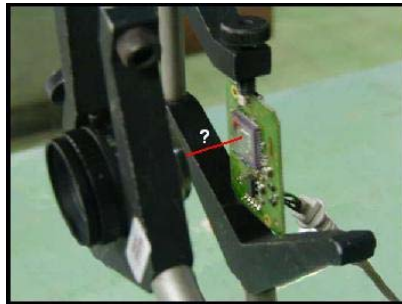


Figura 29 Medición experimental de la distancia focal del sensor R₂D₂

Fuente: Autores.

Aunque la lente Cosmicar mejoró notablemente la calidad de la imagen, la resolución que se obtuvo impidió su uso en este proyecto. Si bien, la lente Cosmicar no fue utilizada en el prototipo final, para poder realizar las pruebas, se maquinó el anillo de acople en el CIC³³, en la figura 30 se aprecia una imagen del anillo acoplado a la cámara.

³² Anexo a la escuela de Física de la Universidad Industrial de Santander.

³³ Corporación para la Investigación de la Corrosión, Universidad Industrial de Santander, sede Guatiguará.



Figura 30 Anillo de acople para lentes tipo C

Fuente: Autores.

Debido a los resultados de las primeras pruebas experimentales, se realizaron una nueva serie de pruebas con lentes de mayor apertura y distancia focal. Donde los lentes seleccionados fueron el Canon, por tener una apertura más amplia y el lente zoom Marexar-S, porque permite variar su distancia focal.

A causa de factores técnicos como la diferencia de tamaño y peso entre la cámara y las lentes fotográficas y en especial por la variación de la distancia focal de 2.6 mm. a 50 mm., se hizo claro que la solución implicaba construir un nuevo cuerpo para la cámara, el cual permitió adaptar el sensor a los nuevos elementos.

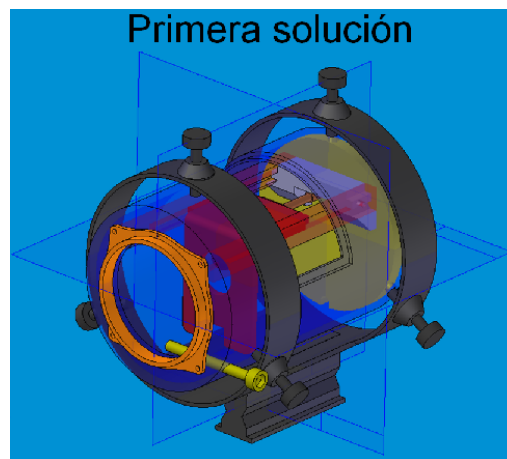


Figura 31 Primer diseño del sensor estelar R₂D₂

Fuente: Autores.

Como se aprecia en la figura 31, el primer diseño ubica la placa del sensor sobre un par de rieles que facilitan su desplazamiento, el cual es accionado por un tornillo que empuja la placa desde la parte posterior del dispositivo, este desplazamiento permite ajustar el sensor a un rango de distancias focales, las cuales oscilan entre un valor mínimo de 40 mm y un valor máximo de 80 mm.

En la parte frontal se ubicó un acople de cámara fotográfica y un tornillo que permite accionar el mecanismo que controla el diafragma del lente. Todo el conjunto se sostiene dentro de un cilindro, el cual se posiciona por medio de un sistema de anillos concéntricos, imitando la estructura del buscador del telescopio y su soporte.

Una vez se realizaron los planos (Véase anexos), estos fueron enviados al CIC para su mecanización, en donde un experto en el área³⁴ sugirió una serie de modificaciones al diseño, pues debido a la exigencia técnica en la mecanización de las piezas, los costos ascendían a los 2 millones de pesos, muy por encima de lo presupuestado.

Es así que se regresó al diseño, de donde finalmente se llegó a uno que satisfacía los requerimientos técnicos y financieros; el diseño final se mecanizó en los tornos de alta precisión del CIC, donde se fabricaron las 3 piezas que conforman el conjunto: Una cubierta superior y un brazo de extensión fabricados en aluminio y una base que se fabricó con un polímero a base de nylon.

Esta vez no se consideró la fabricación del soporte, pues las medidas se ajustaron para poder utilizar el mismo que el telescopio Meade LX-90 posee para su buscador.

³⁴ Hernán Garnica, físico, miembro del CIC.

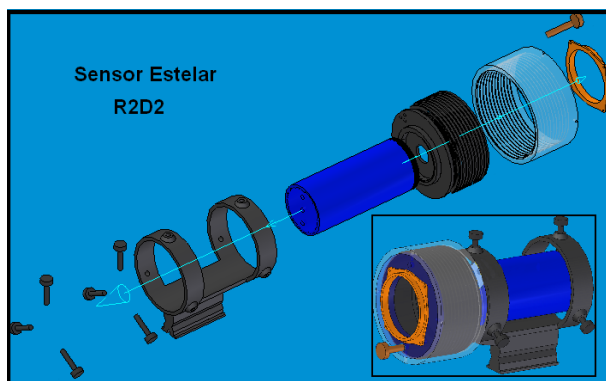


Figura 32 Diseño final del sensor estelar R₂D₂

Fuente: Autores

El conjunto (Véase la figura 32) se simplificó respecto al diseño anterior, pero sin cambiar su funcionalidad, permite variar la distancia focal, gracias al desplazamiento de la tapa superior respecto a la base, ambas piezas poseen roscados de precisión, que permiten desplazamientos de 1 mm por vuelta. En el anexo se detallan los planos del sensor.

Un tornillo, ubicado en la parte frontal ajusta la cubierta superior a la base, fijándola en la distancia focal deseada. Esta distancia puede oscilar entre un mínimo de 40 mm y un máximo 80 mm Junto al tornillo se encuentra el soporte para lentes de tipo bayoneta.



Figura 33 El sensor estelar sobre el telescopio.

Fuente: Autores.

En la parte posterior de la base se encuentra el brazo extensor que es removible. Esta pieza sujeta el sensor al soporte y cuando se retira permite usar el sensor estelar como sistema de captura, en la figura 33 se aprecia una imagen del sensor montado sobre el telescopio Meade LX-90.

El procedimiento consiste en retirar la lente del sensor y acoplarlo a foco primario, tal como se mostró en la sección 3.2.3. Así, el sensor estelar se convierte en un sistema de adquisición de imágenes que utiliza como lente la óptica del telescopio.

4.3.3 Caracterización del sensor estelar

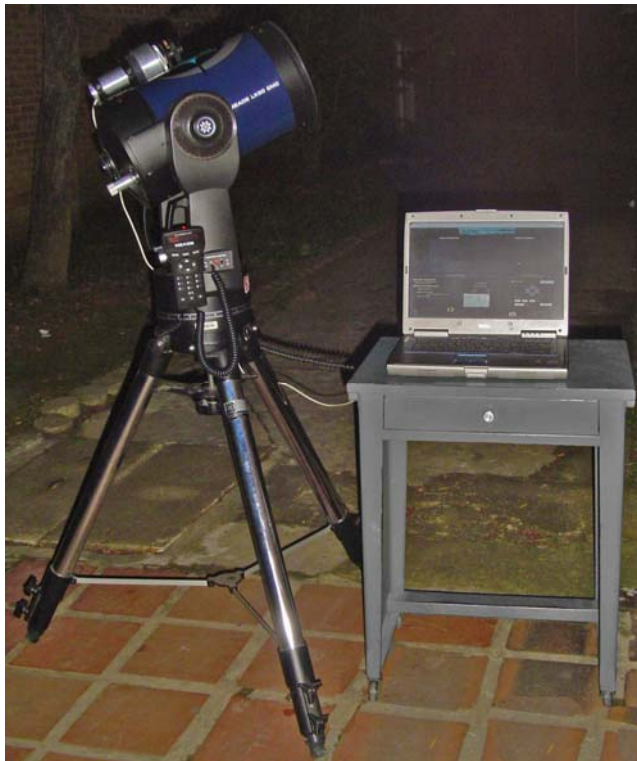


Figura 34 Montaje de todo el sistema.

Fuente: Autores.

Durante el desarrollo de esta investigación, el sistema fue sometido a una serie de pruebas de campo y simulación. Los resultados obtenidos permitieron caracterizar el sensor y ajustar distintos parámetros del software.

Esta sección está dedicada a mostrar los resultados de las pruebas de campo. En la figura 34 se aprecia todo el sistema durante una noche de pruebas.

La caracterización del sensor estelar fue una de las principales pruebas a realizar, esta permitió calcular datos técnicos necesarios para el desarrollo de los algoritmos de identificación y seguimiento.

Como resultado de estas pruebas se concluyó que el sensor estelar registra estrellas de hasta magnitud 2.5, las cuales ocupan un área entre 9 y 70 píxeles sobre el sensor. En la figura 35 se aprecia el registro de la estrella Sirio de magnitud visual -1.5V. Este es el registro estelar más amplio que se pudo obtener y se debe gracias a que, vista desde la tierra, Sirio es la estrella más brillante.

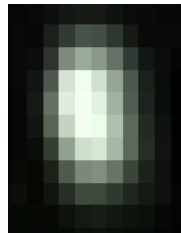


Figura 35 La estrella Sirio registrada con el sensor.

Fuente: Autores.

Los registros obtenidos dependen de varios factores como:

- * La magnitud visual de la estrella.
- * El porcentaje de nubosidad en el momento de la captura.
- * El “centelleo” propio de cada estrella.

Un ejemplo que sustenta estas conclusiones es el presentado a continuación, donde se muestran dos registros consecutivos de la estrella Mintaka (figura 36), la cual pertenece al cinturón de la constelación de Orión.

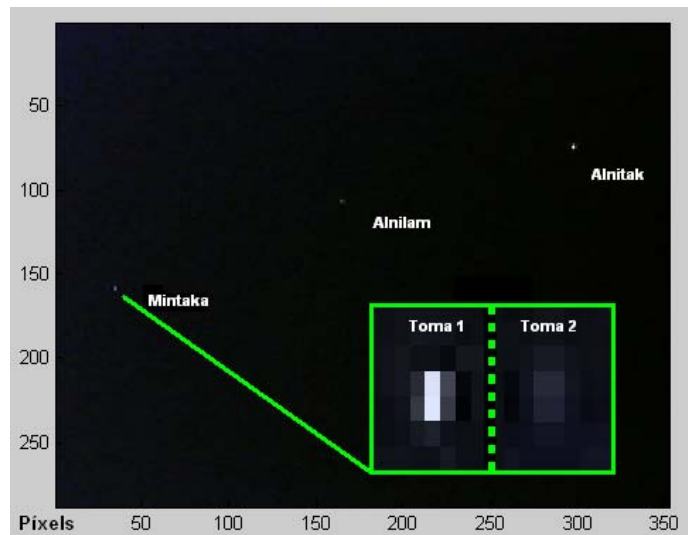


Figura 36 Acercamiento sobre Mintaka

Fuente: Autores

Comparando los resultados con los mostrados en la figura 35, es clara la disminución del área en píxeles, mientras la estrella Sirio ocupa un área aproximada de 70 píxeles de la imagen, Mintaka solo ocupa 6 píxeles; esto es debido a que la magnitud visual³⁵ de la estrella Mintaka es de apenas 2.2 V.

³⁵ Medida del brillo de un cuerpo celeste en una escala logarítmica, donde un cuerpo es más brillante que otro, si su registro se encuentra más hacia la izquierda en la recta numérica

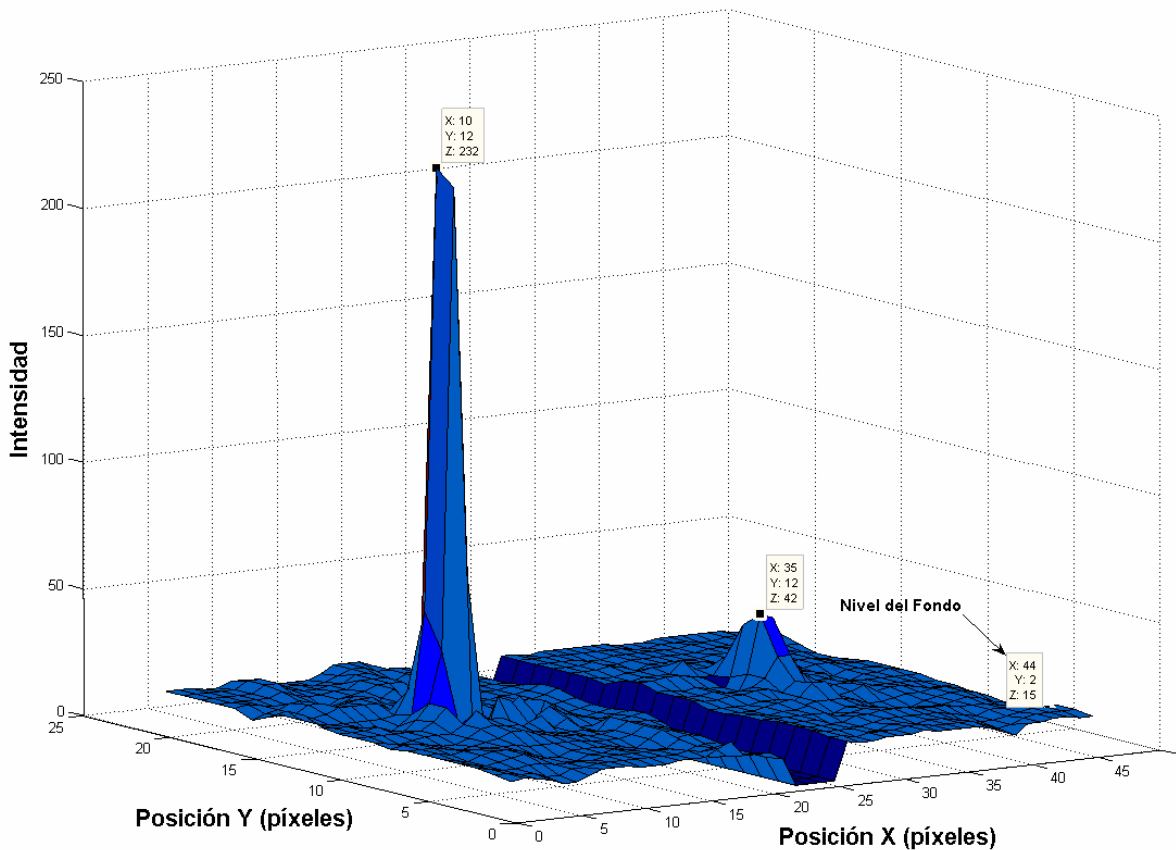


Figura 37 Variación en los niveles de Intensidad para Mintaka.

Fuente: Autores.

Al analizar los niveles de intensidad registrados para Mintaka (ver figura 37), como función de la posición (X,Y) sobre el sensor, se aprecia una reducción en el nivel máximo de intensidad, en un factor de 5.5, producto del “centelleo” propio de la estrella, el cual es originado por irregularidades en la atmósfera terrestre, que hacen refractar la luz proveniente de la estrella en diferentes direcciones, generando además un cambio del color que se percibe de la estrella.

Debido a que estas variaciones son completamente aleatorias, el algoritmo de identificación no utiliza el nivel de intensidad registrado como parámetro de búsqueda (más adelante se hablará de este algoritmo).

Continuando con el análisis de la figura 36, esta misma ha sido utilizada para hallar experimentalmente el campo de visión (FOV) y la resolución del sensor estelar, valores con los cuales se estimó el tamaño del píxel del sensor CMOS. Estas medidas se realizaron experimentalmente, ya que el fabricante³⁶ no proporciona el tamaño del píxel.

El procedimiento consistió en realizar una toma de una región del cielo, plenamente identificada, para esto se trabajó con el cinturón de Orión (figura 36), del cual se conocen sus coordenadas (Tabla 3), extraídas del catálogo Hipparcos.

Tabla 3 Coordenadas de las estrellas del cinturón de Orión

ID	estrella	α (HH mm ss)	α (grados)	δ (gg° mm' ss'')	δ (grados)	V
1	Alnitak	05 40 45.527	85.190	-01 56 33.26	-1.943	1.74
2	Alnilam	05 36 12.813	84.053	-01 12 06.91	-1.202	1.69
3	Mintaka	05 32 00.401	83.002	-00 17 56.73	-0.299	2.25

Utilizando las ecuaciones (1), (2) y (3) de la sección 3.1.1.3 se llega a la siguiente expresión que permite calcular la distancia angular entre dos estrellas:

$$\cos(A) = \sin(d1) * \sin(d2) + \cos(d1) * \cos(d2) * \cos(ra1-ra2) \quad (28)$$

Donde*:

A es la distancia angular entre la estrella 1 y 2.

d1 es la declinación de la estrella 1.

d2 es la declinación de la estrella 2.

Ra1 es la ascensión recta de la estrella 1.

Ra2 es la ascensión recta de la estrella 2.

*Todas las medidas están en grados

³⁶ Philips Electronics

Aplicando la ecuación (25) a la tabla 3, se obtuvo la matriz de distancias de la tabla 4.

Tabla 4 Distancias angulares entre las estrellas del cinturón de Orión

ID	estrella	Alnitak	Alnilam	Mintaka
1	Alnitak	0	1.356	2.736
2	Alnilam	1.356	0	1.386
3	Mintaka	2.736	1.386	0

El siguiente paso fue hallar las posiciones (x,y) de los centroides, para cada una de las estrellas presentes en la imagen capturada, con esta información se hizo el cálculo de las distancias cartesianas (en píxeles) entre los centroides, las cuales se resumen en la tabla 5.

Tabla 5 Distancias de separación sobre la imagen, para las estrellas del cinturón de Orión

ID	Posición X	Posición Y	Distancia A	Distancia B
3	34.5	158.5	140.01	276.45
2	164.5	106.5	140.01	137.16
1	297.86	74.429	276.45	137.16

Como en un principio se conocía la posición de cada estrella en la imagen, se halló la relación entre la distancia angular (en grados) y la distancia cartesiana (en píxeles) de las estrellas (ver tabla 6), esta relación se conoce como la **resolución del sistema**, cuyas unidades son segundos de grado/píxel y está dada por la ecuación 2, vista en el primer capítulo de este libro.

$$\rho(\text{experimental})["/\text{pix}] = 3600 * \frac{\text{Distancia angular}[\text{grados}]}{\text{distancia cartesiana}[\text{píxeles}]} \quad (29)$$

Tabla 6 Estimación de la resolución del sensor

Estrellas	Distancia angular (En grados)	Distancia cartesiana (En píxeles)	Resolución ρ(experimental) (En "/pixel)
Alnilam-Mintaka	1.386	140.01	35.636
Alnitak - Mintaka	2.736	276.45	35.675
Alnitak - Alnilam	1.356	137.16	35.685

Donde el valor medio de ρ (experimental) es:

$$\rho(\text{experimental})=35.665 \pm 0.001["/\text{pix}]$$

Asumiendo que el sensor tiene píxeles de forma cuadrada, se tiene que para el sensor estelar R₂D₂ con distancia focal de 50mm y resolución de 35.665["/pix], un tamaño del píxel obtenido de la ecuación (5) igual a:

$$\frac{35.665*50}{206.265}=8.645\mu\text{m} \quad (30)$$

Finalmente, el campo de visión (FOV) del sensor se calcula al multiplicar la resolución del sensor 35.665 ± 0.001["/pix] por la resolución de la imagen 352x288[pix].

$$\begin{aligned} FOV_{hztal} &= \frac{35.665}{3600} * 352 = 3.487^\circ \\ FOV_{vtcal} &= \frac{35.665}{3600} * 288 = 2.853^\circ \end{aligned} \quad (31)$$

4.4 Automatización y control

4.4.1 Características telescopio Meade.

El Meade LX90 es un telescopio motorizado, que cuenta con un sistema embebido que controla los accionamientos de los servomotores, permite además la interacción hombre-máquina a través de un control de mando, el cual incluye un teclado para ingresar datos y un display para visualización.

Internamente, el control de mando contiene un microcontrolador PIC 16C57, el cual se encarga de recibir y enviar las instrucciones al sistema central, que es administrado por un microcontrolador Motorola 68HC11 con una memoria flash de 1 MB, donde reside el programa Autostar, encargado de todo el procesamiento para el control de los servomotores del telescopio. Otra característica del sistema Autostar es la amplia base de datos que contiene, con la que es posible ubicar más de 30000 objetos.

El sistema Autostar permite la comunicación vía serial con un computador personal a través del puerto RS232, por donde es posible enviar y recibir información, que permite, entre otras funciones, accionar los servomotores.

El fabricante ha liberado el set de instrucciones³⁷, propio del sistema central, con lo que el proceso de comunicación con el microcontrolador es limpio para el programador, quién envía las instrucciones como comandos de tipo ASCII.

Además de las características ya mencionadas, el telescopio meade LX90 presenta las especificaciones que se resumen en la tabla 7.

³⁷ Para ver el set completo véase la sección de anexos.

Tabla 7 Características telescopio Meade

Óptica	Catadióptrico Schmidt Cassegrain
Apertura	8"
Distancia focal	2000mm
Relación focal	f/10
Poder de resolución	0.56 segundos de arco
Engranaje	4.9" diámetro tipo sinfín/corona en ambos ejes
Montura	Altazimutal
Resolución angular	5 minutos de arco en modo GO TO
Velocidad de desplazamiento	1x sideral a 6.5°/segundo en 9 incrementos

4.4.2 Puertos.

4.4.2.1 Puerto serie

Como ya se ha mencionado, el Telescopio *Meade* cuenta con un puerto serie para comunicarse con el computador, el formato de envío de datos serial se muestra en la figura 38

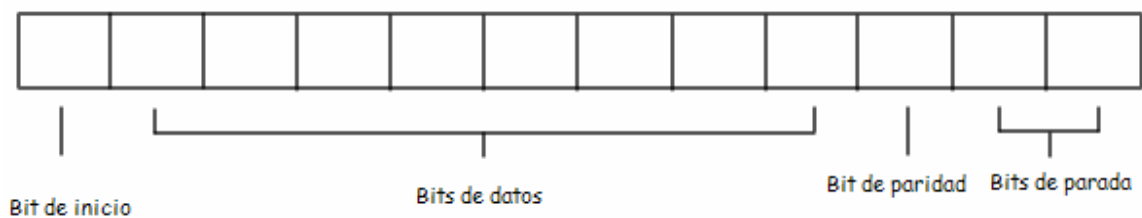


Figura 38 Formato de envío de datos serial

Fuente: Autores.

Como se puede apreciar, el formato cuenta con un bit de inicio, ocho bits de datos, un bit de paridad y dos bits de parada. El envío de datos se maneja de manera

síncrona. El bit de inicio es transmitido con un valor de 0. Los bits de datos son transmitidos iniciando con el bit menos significativo (LSB) y finalizando con el bit más significativo (MSB). Luego se procede a la transmisión del bit de paridad, finalizando con los bits de parada, cada uno con el valor de 1.

La velocidad de transmisión fue configurada a 9600 Bauds, donde la conexión se maneja bajo el estándar RS-232 de 9 pines.

4.4.3 Modificaciones.

Para el correcto funcionamiento del sistema, se hicieron necesarias algunas modificaciones y adaptaciones al telescopio, las cuales se comentan a continuación.

4.4.3.1 Remoción buscador principal

El buscador (Figura 39) funciona como un pequeño telescopio el cual presenta un mayor campo de visión que el telescopio principal. Está sujeto al telescopio por medio de un soporte con anillos, los cuales permiten una colimación del sistema. Su remoción se llevó a cabo, con el fin de aprovechar este soporte y lograr un acople en paralelo o piggy-back al sensor estelar³⁸.



buscador

Anillos

Figura 39 Sistema Buscador-soporte del telescopio Meade LX-90

Fuente: <http://www.meade.com>

³⁸ Ver marco teórico

4.4.3.2 Cable de conexión serial al Autostar

Para hacer posible una comunicación entre el computador y el telescopio, se adecuó un cable serial con conectores DB9 - RJ-11, el esquema del cableado interno se muestra en la figura 40 y el cable construido se ve en la figura 41.

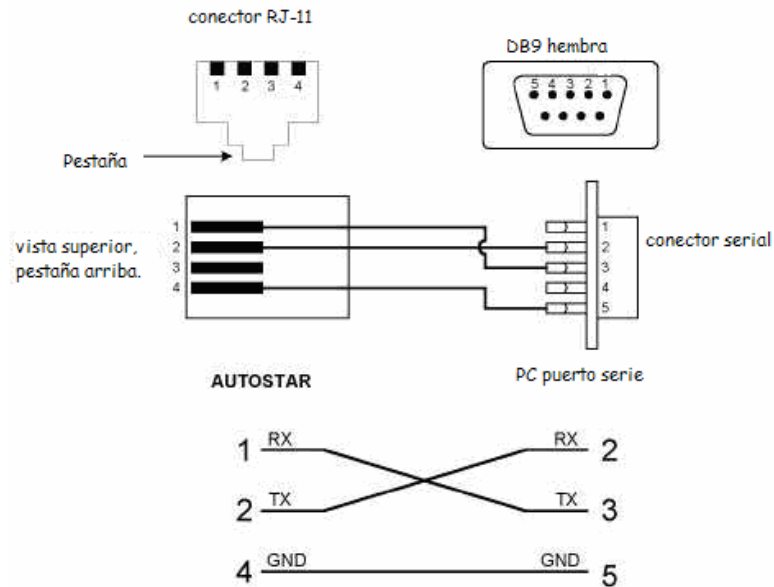


Figura 40 Conexión serial computador telescopio. Conectores DB9- RJ-11.

Jan's LX90 pages (<http://m1.aol.com/kewtasheck/lx90.html>)



Figura 41 Cable de conexión adaptado

Fuente: Autores.

4.5 Algoritmos

A continuación se explican los algoritmos principales, los cuales fueron diseñados para adquirir y procesar la información proveniente del sensor estelar R₂D₂, donde hardware y software se unen, para así cumplir los objetivos propuestos.

Todos los algoritmos acá explicados se encuentran implementados bajo la interfaz gráfica, el único contacto que el usuario realiza con ellos es en la entrada y salida de datos, permitiendo que una persona sin conocimientos avanzados de astronomía, pueda hacer uso de este programa.

Los algoritmos junto con otras funciones desarrolladas conforman la interfaz gráfica llamada OEIL 1.0, de la cual se hablará en detalle más adelante.

4.5.1 Indexado

El éxito del programa de identificación se debe en parte a la base de datos en donde se buscan las distancias medidas sobre la imagen; pero para que la búsqueda sea eficiente, esta base de datos debe estar diseñada para ajustarse a las condiciones de búsqueda (Campo de visión, magnitud, etc.).

Pensando en la adaptabilidad del proyecto a una futura optimización del sensor estelar y al hecho de que se puede trabajar con imágenes de archivo, las cuales no necesariamente debieron haber sido capturadas con el sensor, se ha diseñado un algoritmo altamente eficiente (en tiempo de ejecución y almacenamiento), el cual permite crear una base de datos acorde a las características que el usuario disponga.

En la figura 42 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo de indexado, donde se muestran todos los pasos realizados durante la creación del catálogo indexado.

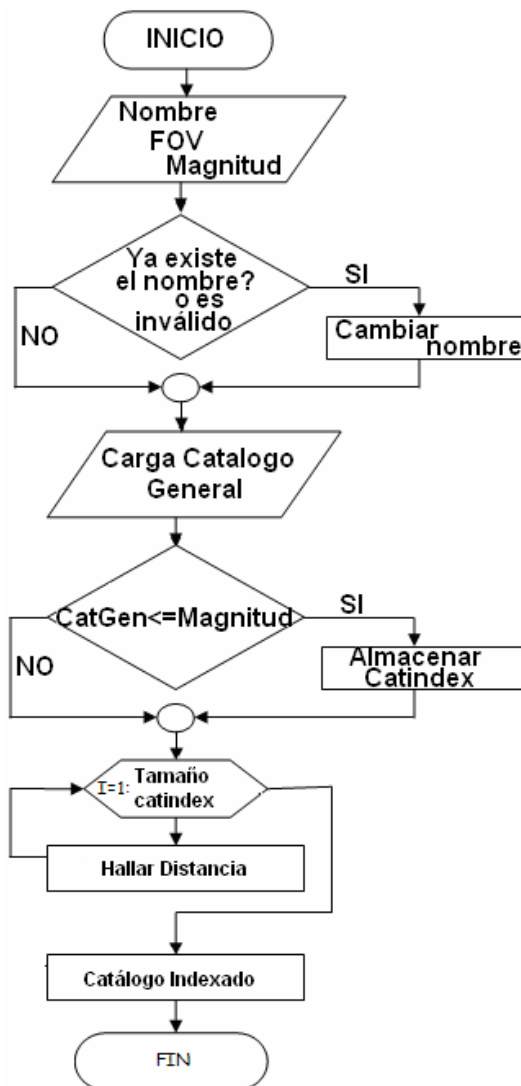


Figura 42 Algoritmo para el indexado del catálogo.

Fuente: Autores.

Para la ejecución del algoritmo se necesita adjudicar como variables de entrada un nombre para el catálogo indexado, el campo de visión de la cámara (FOV) y la magnitud visual límite. Con esta información, el algoritmo procede a cargar su propia versión del catálogo Hipparcos, el cual es un arreglo matricial de 3 columnas, la primera de ellas corresponde a la ascensión recta en grados, la segunda es la declinación, también en grados y la tercera es la magnitud visual de las 5041 estrellas que contiene el catálogo general.

Si el usuario desea, puede realizar una ampliación de este catálogo, modificando el archivo **catgen.mat**, siempre y cuando mantenga el formato.

Una vez está cargado el catálogo general, se procede a reducirlo mediante la magnitud, en la versión indexada solo aparecerán las estrellas de menor o igual magnitud a la introducida al crear el catálogo.

Cuando ya se tiene la versión reducida del catálogo, se procede a hallar las distancias de separación entre las estrellas que lo componen. En la figura 43 se aprecia gráficamente el procedimiento a seguir, el cual se realiza para cada una de las estrellas contenidas en el catálogo ya reducido.

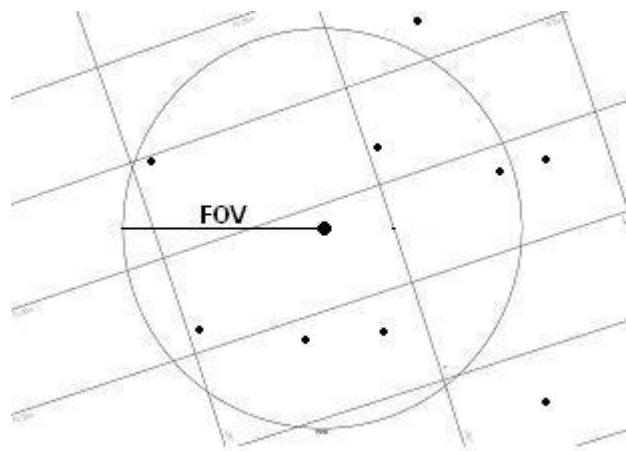


Figura 43 Principio de indexado

Fuente: Autores.

El algoritmo se ubica sobre cada una de las estrellas de catálogo reducido y traza un círculo de radio igual al FOV introducido, dentro del círculo que se crea, se encuentran una serie de estrellas las cuales serán las que se indexan respecto a la estrella central. Las estrellas que quedan por fuera del círculo no se tendrán en cuenta.

Una vez se sabe cuales son las estrellas que se encuentran dentro del círculo, se procede a calcular la distancia angular que las separa de la estrella central, para esto se hace uso de la ecuación (28). En la figura 44 se muestra las distancias calculadas, de donde se indexarán las distancias de las estrellas E2 hasta la E7, mientras que las estrellas E9-E11 y en general del resto del catálogo, serán descartadas.

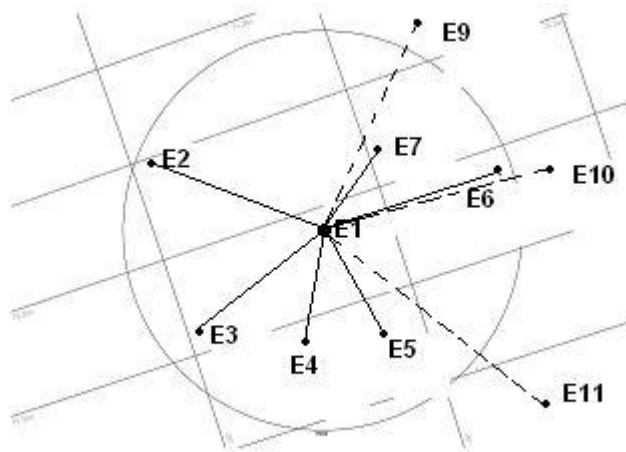


Figura 44 Selección de estrellas a indexar.

Fuente: Autores.

Al final del proceso se tiene una matriz de dimensiones $n \times (n+3)$, donde n corresponde al número de estrellas del catálogo reducido.

La matriz del catálogo indexado contiene 3 vectores columna y la matriz de distancias (que es simétrica y con la diagonal igual a 0). Cada fila hace referencia a una estrella del catálogo, las 3 primeras columnas son respectivamente la ascensión recta, declinación y magnitud; mientras que cada una de las n columnas siguientes es la distancia que la separa de las demás estrellas del catálogo, solo que si esta distancia es superior al FOV, aparece un 0 (cero) como valor. En la figura 45 se aprecia la estructura general del catálogo indexado.

$$\begin{matrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_n \end{matrix} \begin{pmatrix} \alpha_1 \delta_1 & V_1 & 0 & D_{12} & D_{13} \dots & D_{1i} \dots & D_{1n} \\ \alpha_2 \delta_2 & V_2 & D_{21} & 0 & D_{23} \dots & D_{2i} \dots & D_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_n \delta_n & V_n & D_{n1} & D_{n2} \dots & D_{ni} \dots & D_{n(n-1)} & 0 \end{pmatrix}$$

Figura 45 Esquema general del catálogo indexado

Fuente: Autores.

4.5.2 Detección e identificación de las estrellas en la imagen

Estos algoritmos permiten la identificación de las coordenadas de las estrellas capturadas por el sensor estelar y se fundamentan en el uso de técnicas de procesamiento digital de imágenes. En la figura 46 se aprecian las diferentes etapas del procesamiento realizado³⁹.

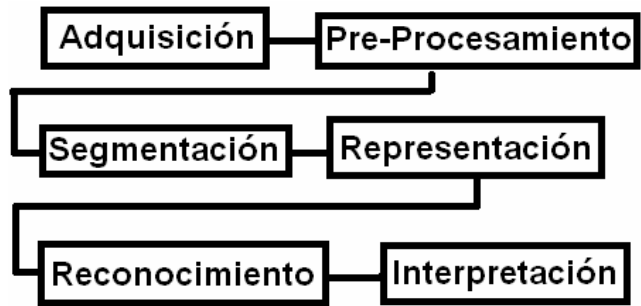


Figura 46 Etapas del procesamiento realizado

Fuente: Autores.

Los procesos de pre-procesamiento, segmentación, representación, reconocimiento e interpretación, son implementados en el algoritmo de detección, en donde son entregadas las coordenadas de las estrellas presentes en la imagen.

³⁹ Ver marco teórico.

Una segunda interpretación de resultados es llevada a cabo en el algoritmo de identificación, esta vez, de las coordenadas ecuatoriales de las estrellas.

4.5.2.1 Algoritmo de detección:

La función principal de este algoritmo de detección es la de encontrar las diferentes estrellas presentes en la imagen con las respectivas coordenadas en los ejes xy (en píxeles) de sus centroides y posteriormente dar una relación de las distancias (en grados) obtenidas entre cada una de ellas.

Estos resultados se entregan a una segunda etapa de identificación, la cual será explicada mas adelante. El algoritmo *de detección* se describe la figura 47.

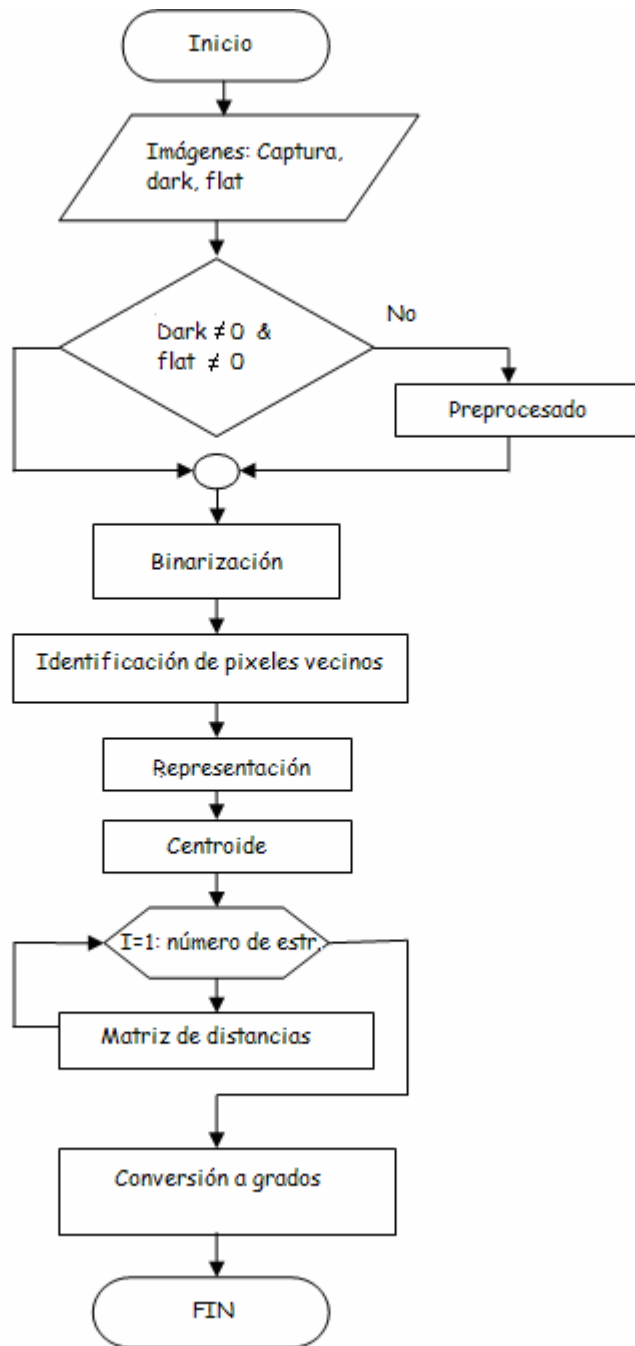


Figura47 Diagrama de flujo del algoritmo de detección

Fuente: Autores.

El proceso comienza ingresando la imagen a identificar, el sistema permite manejar o no, las imágenes de *Dark current* o corriente oscura y las de *flat field* o

aplanamiento del campo. La etapa de pre-procesamiento, si se cuenta con estas imágenes, inicia con la limpieza de la imagen según la ecuación (32).

$$\text{Imagen corregida} = (\text{Imagen inicial} - \text{Dark}) / \text{flat} \quad (32)$$

Para el procesamiento de imágenes del sensor estelar es altamente recomendada la etapa de reducción de ruido. Este incremento en la relación señal a ruido puede ser significativo para una correcta identificación de las estrellas capturadas.

En la figura 48, se pueden apreciar los resultados obtenidos de este proceso inicial para una imagen del planeta Marte, capturada con el sensor estelar.

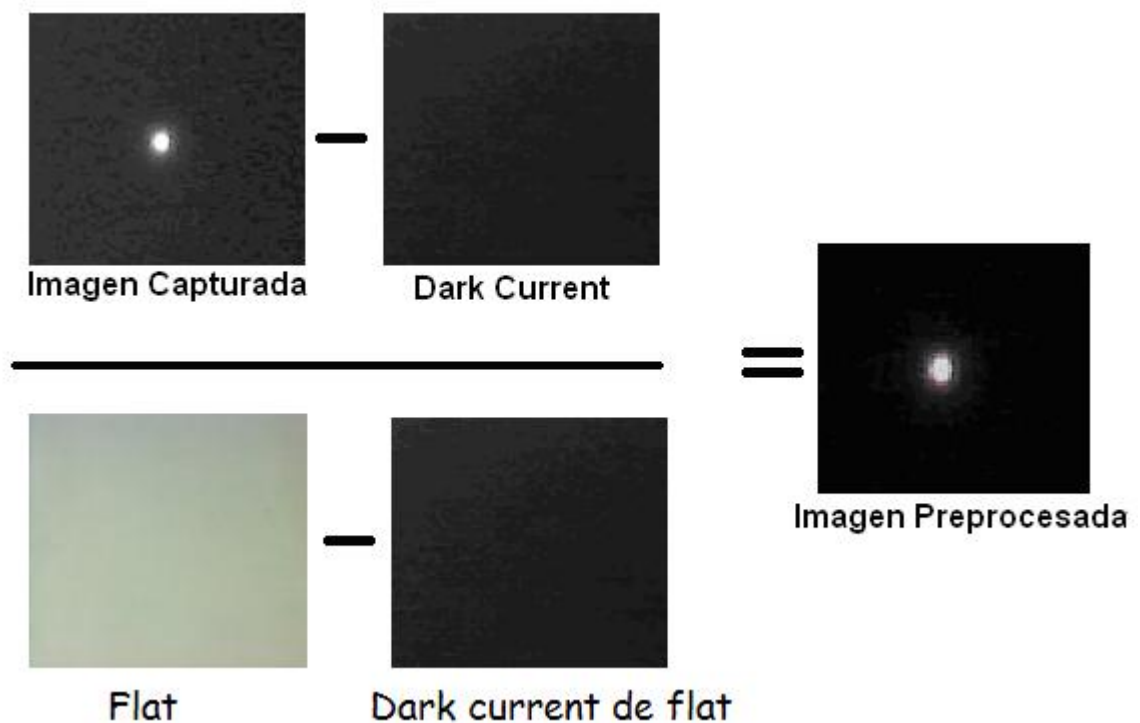


Figura 48 Preprocesado de la señal.

Fuente: Autores.

Las figuras 49 y 50 permiten apreciar el efecto sobre la imagen al realizar la reducción de ruido: en la figura 49 se ve que la curva de intensidad presenta un nivel de offset. Este nivel es debido a la sumatoria de todas las fuentes de ruido presentes en la imagen; para el ejemplo, alcanza valores de 41 en intensidad, donde el máximo registro de la imagen es de 253, luego el nivel del ruido es aproximadamente la sexta parte del mayor nivel registrado en la imagen.

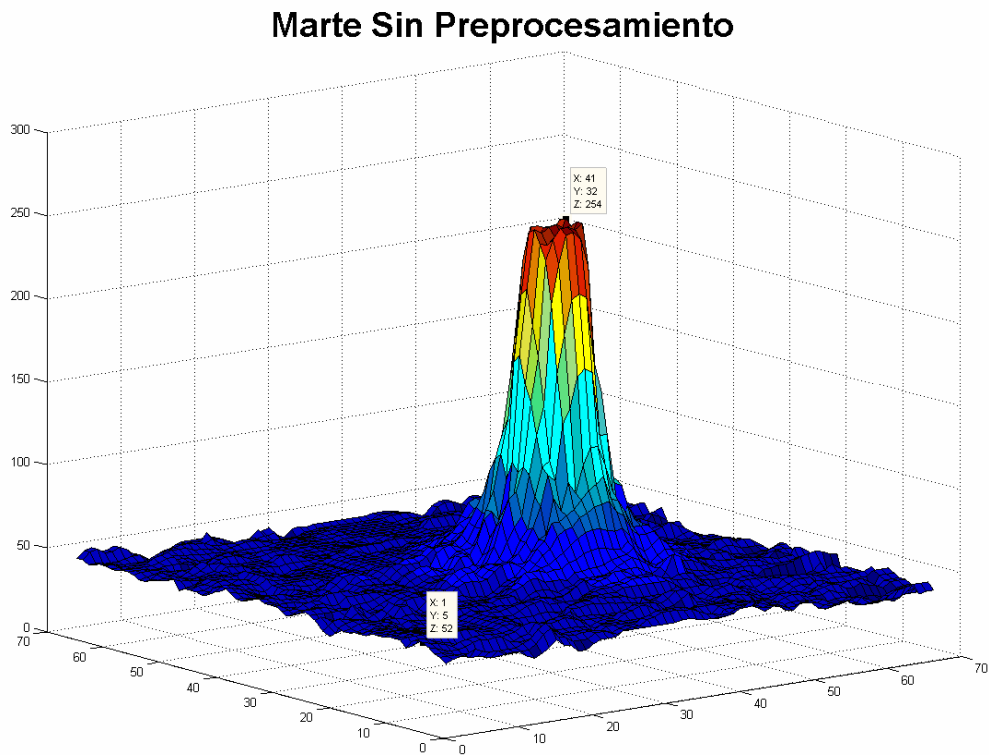


Figura 49 Nivel de intensidad de Marte, sin pre-procesamiento

Fuente: Autores

Marte Con Preprocesamiento

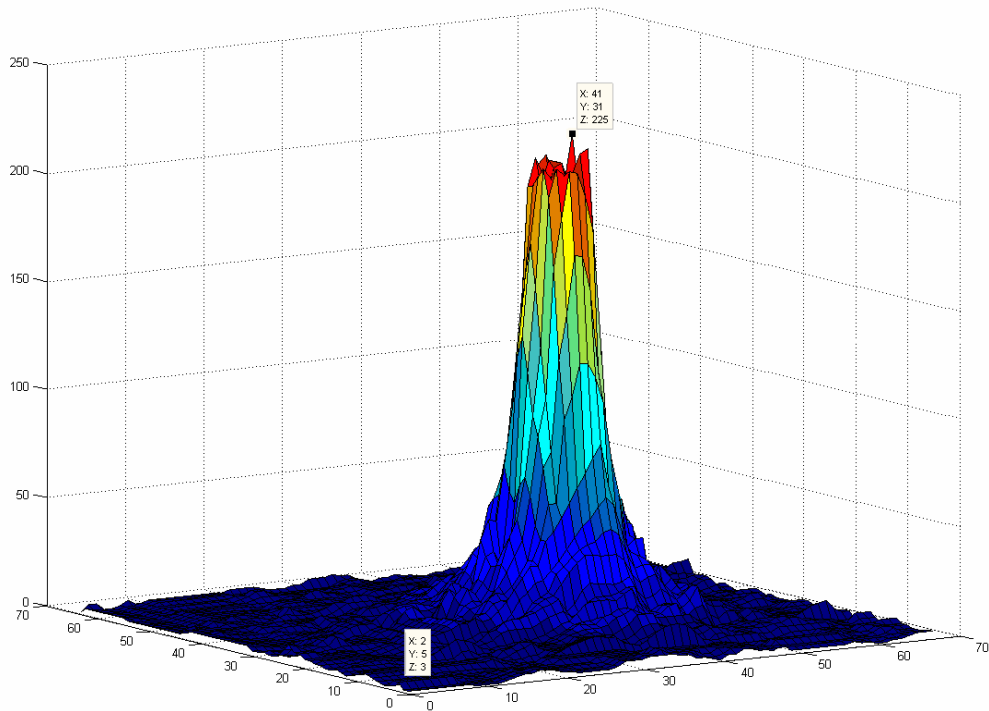


Figura 50 Nivel de intensidad de Marte, con pre-procesamiento

Fuente: Autores

Como resultado de aplicar las técnicas de reducción de ruido, se obtiene una reducción en el nivel del offset. En la figura 50 se muestra la curva de intensidad para la misma imagen de Marte, pero luego del pre-procesado. Ahora el nivel del ruido se redujo hasta valores menores a 10, es decir 25 veces menor al máximo nivel registrado en la imagen.

Una vez se reduce el ruido térmico se procede a la etapa de segmentación en donde la imagen corregida se binariza con un umbral adecuado, escogido a partir de diferentes pruebas con estrellas de alta y baja magnitud.

Para determinar este umbral de binarización se analizó el histograma obtenido de las imágenes (ver figura 51), donde se aprecia el contraste entre el fondo y la estrella a analizar.

Para realizar este proceso de manera automática, se utilizó el método de Otsu, el cual elige el umbral óptimo maximizando la varianza entre clases mediante una búsqueda exhaustiva, pero requiere una clara diferencia entre los objetos a extraer respecto del fondo de la escena⁴⁰.

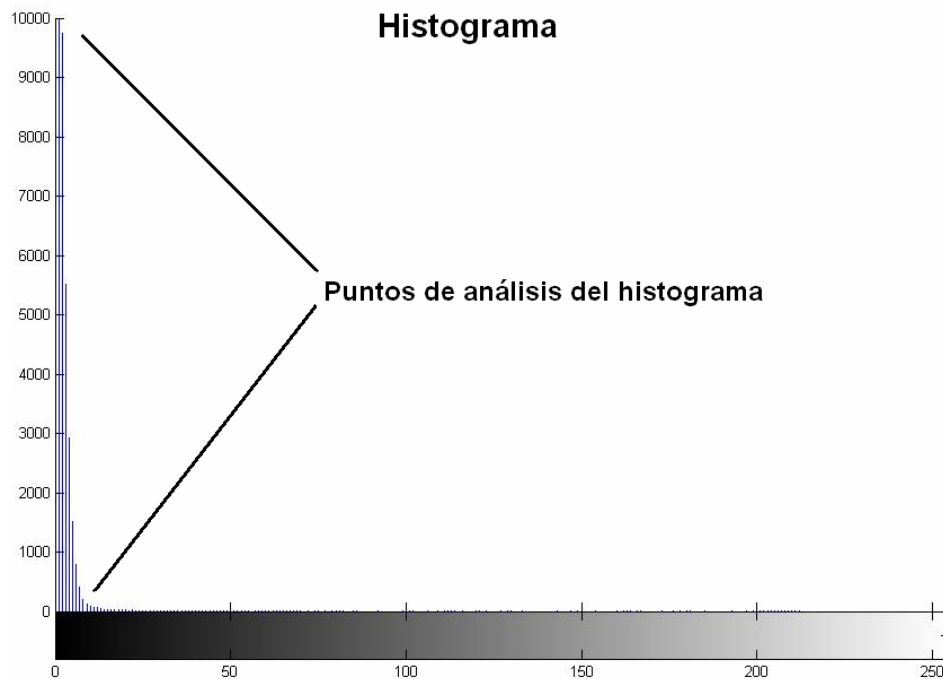


Figura 51 Histograma de una estrella.

Fuente: Autores.

Al ser implementado este método se notó que el umbral era eficiente para la mayoría de las imágenes probadas; sin embargo presentaba fallas para estrellas débiles en la imagen, para las que el umbral hallado era tan bajo que detectaba

⁴⁰ Este método se profundiza en [15]

como estrellas ciertas regiones donde sólo había parte del ruido que no había podido ser eliminado.

Dado que la mayoría de las estrellas presentaban un umbral muy cercano, se hallaron estos umbrales para varias tomas, calculando un valor medio entre los datos resultantes, se encontró que este umbral estándar funciona correctamente, incluso para las imágenes con estrellas débiles.

Una ventaja de esta estandarización, basado en el comportamiento de umbralización de diversas imágenes estelares, es la reducción del tiempo de ejecución del algoritmo de identificación.

En la figura 52 y 53 se puede apreciar el resultado de la binarización para una estrella brillante (Sirio) y para 3 estrellas más débiles (Mintaka, Alnitak, Alnilam).

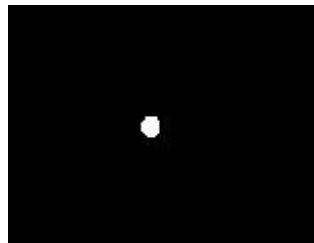


Figura 52 Binarización de Sirio

Fuente: Autores.

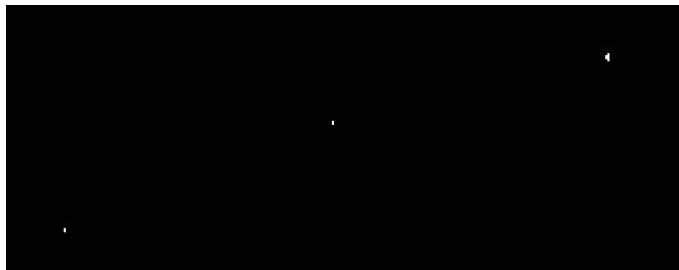


Figura 53 Binarización del cinturón de Orión

Fuente: Autores.

Una vez la imagen es binarizada, se encuentran los conjuntos de píxeles vecinos para conseguir así una detección de las estrellas presentes, obteniendo de cada una de ellas la posición (X,Y) sobre la imagen y el número de píxeles que las conforman.

El tamaño en píxeles es un criterio para diferenciar las estrellas de otros objetos como planetas, la luna, un avión, árboles y en general cualquier otro objeto diferente a las estrellas.

Esta diferenciación toma como referencia a la estrella Sirio. Al ser la estrella más brillante vista desde la Tierra, posee el registro de mayor área. En consecuencia, los objetos capturados que tengan un área mayor serán discriminados.

Posteriormente, se encuentra el centroide de cada estrella, utilizando el método del centro de masas descrito en el marco teórico.

Este proceso permite tener un punto de referencia confiable que represente cada estrella. Los resultados de esta etapa se pueden apreciar en la figura 54, donde las cruces rojas señalan los centroides, el recuadro marca un acercamiento sobre una de las estrellas en la imagen.



Figura 54 Determinación de los centroides en la imagen

Fuente: Autores.

Una vez hallados los centroides, se procede a calcular las distancias cartesianas entre todos los centroides.

Las distancias obtenidas están dadas en píxeles, multiplicando este valor por la resolución del sistema se obtienen las distancias angulares, en grados, medidas sobre la imagen.

Estos datos son transformados a grados por píxel, por medio de la ecuación (33), ya que el catálogo indexado se encuentra bajo este formato.

$$D(^{\circ}) = \rho * \frac{dist}{3600} \quad (33)$$

Donde *dist* es la distancia obtenida en píxeles y ρ es la resolución del sistema.

Como el programa brinda la opción de trabajar con imágenes almacenadas en disco, para realizar la identificación sobre ellas se debe conocer el campo que abarca la imagen y su tamaño en píxeles, para que así el algoritmo pueda determinar la resolución ρ .

Para esta opción la resolución se halla bajo la ecuación (34) [16]:

$$\rho(\%_{pix}) = campo * \frac{3600}{tamaño\ imagen} \quad (34)$$

Donde:

Campo: Es el campo horizontal de la imagen dado en grados

Tamaño imagen: es el tamaño horizontal de la imagen en píxeles.

Finalmente, estos datos son introducidos al algoritmo como variables de entrada, las cuales son procesadas. Los resultados manejados internamente por el algoritmo son:

q2: Es un vector que brinda la información del número de píxeles de cada estrella usado para hallar los centroides.

K: escalar que representa el número de estrellas encontradas en la imagen.

Grados: Es una matriz de dimensiones (K x K+1) con el formato:

$$\begin{pmatrix} X_1 & Y_1 & D_{12} & D_{13} \dots & D_{1m} \dots & D_{1(k-1)} \\ X_2 & Y_2 & D_{21} & D_{23} \dots & D_{2m} \dots & D_{2(k-1)} \\ \vdots & \vdots & & & & \\ X_k & Y_k & D_{k1} & D_{k2} \dots & D_{km} \dots & D_{k(k-1)} \end{pmatrix}$$

Donde X_k y Y_k son las coordenadas en píxeles de la estrella con posición k en la imagen y D_{km} es la distancia entre la estrella de posición k y la estrella de posición m.

4.5.2.2 Etapa de identificación

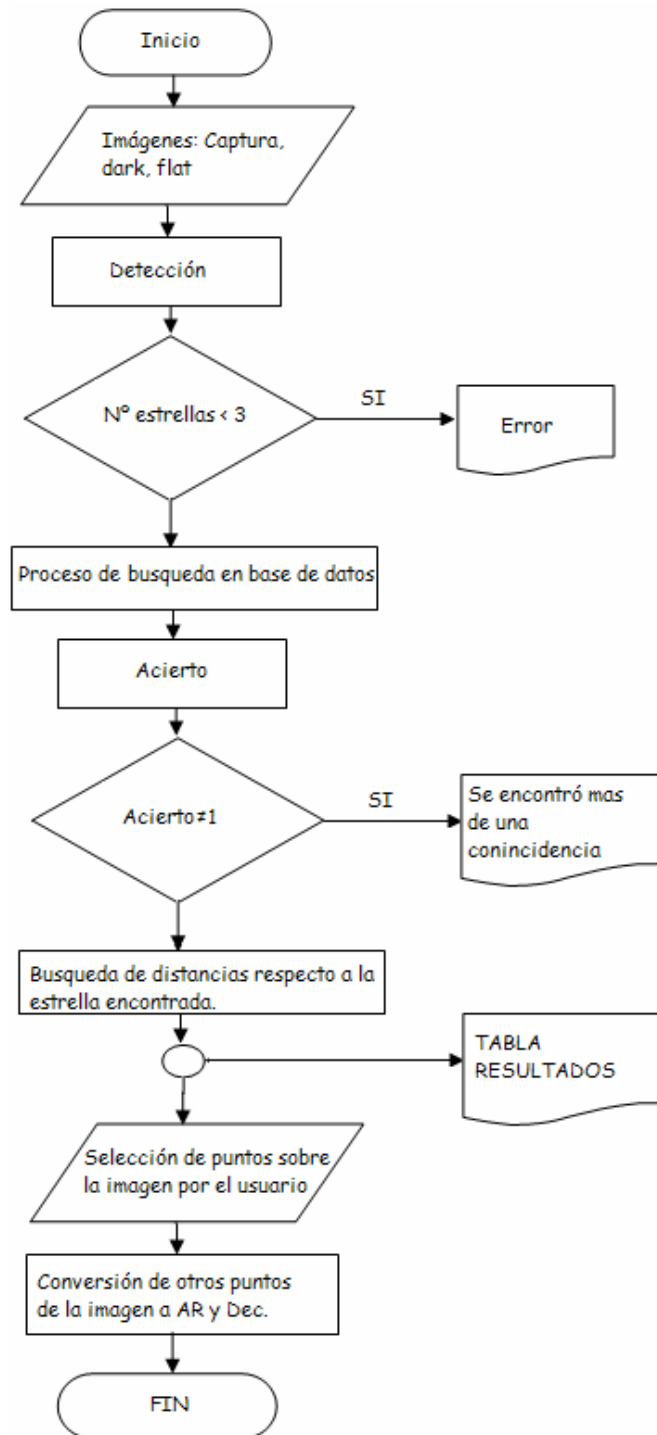


Figura 55 Diagrama de bloques algoritmo identificación.

Fuente: Autores.

El algoritmo general de identificación se ilustra en el diagrama de bloques en la figura 55.

El programa *de identificación* toma los resultados entregados por el proceso de detección, para hacer una comparación con los datos del catálogo estelar y así encontrar los parámetros de las estrellas capturadas en la imagen. Al igual que en la detección, se puede trabajar con imágenes del sensor estelar o con imágenes de archivo (en las que el campo sea conocido).

El programa requiere que por lo menos estén presentes tres estrellas en la imagen, para realizar la identificación de sus respectivas posiciones, además se necesita una base de datos acorde con los parámetros de la imagen. Una correcta elección de la base de datos se traduce en un menor tiempo de procesado y mayores probabilidades de acierto.

El programa realiza una reducción progresiva de las posibles candidatas de estrella a buscar hasta llegar a una única posibilidad, para esto toma cada distancia y la busca dentro del catálogo indexado, teniendo en cuenta un rango de exclusión. Siempre, al comienzo del proceso, cualquier par de estrellas del catálogo indexado pueden ser las estrellas buscadas.

El rango de exclusión se debe considerar, pues para 2 imágenes del mismo campo, siempre existirán leves variaciones en la distancia medida sobre cualquier par de estrellas presentes. Estas diferencias son causadas por el movimiento de los centroides sobre la imagen, pues, como se explicó al comienzo del capítulo, para cada estrella, la intensidad medida presenta variaciones que son aleatorias.

Para llegar a un acierto, el programa toma las distancias entregadas por el programa de detección, posteriormente estas distancias son buscadas dentro de la base de datos, previamente configurada. La estrella que coincida con las

relaciones de distancia es la estrella que el programa determinó como acierto y a la cual serán asignadas las coordenadas y la magnitud respectivas encontrada en el catálogo.

Un fallo en la identificación ocurre, si al final del proceso de identificación no se encuentra ninguna estrella que cumpla con las relaciones de distancia entregadas, en la etapa de detección, es decir, si al final de todo el proceso no se encuentra ningún acierto o si por el contrario, la estrella encontrada como única candidata no coincide con la estrella de la imagen.

Si al final del proceso de identificación se encuentra más de una estrella candidata, se concluye que los datos entregados por la imagen fueron insuficientes, dado que existe un alto grado de coincidencias en las relaciones de distancias.

Visto con más detalle, la búsqueda comienza con la primera estrella de la imagen, tomando todas las distancias que la separan de las demás estrellas encontradas en el proceso de detección, el rango de tolerancia que se asigna a cada distancia es de $\pm 1.5\%$, este rango fue hallado experimentalmente durante la etapa de simulación. Dada esta tolerancia, es necesario aclarar que el algoritmo no busca dentro del catálogo indexado una distancia fija, sino un rango de distancias, es por esto que siempre existirá la probabilidad que más de dos estrellas compartan el mismo rango.

Para realizar la identificación de la estrella, se accede a la base de datos, donde cada columna y cada fila están relacionadas con una estrella, como se observa en la figura 56. CDM-n son las distancias entre cada una de las diferentes estrellas contenidas dentro del catálogo.

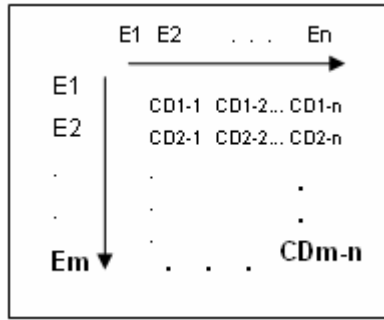


Figura 56 Estructura del catálogo indexado

Fuente: Autores.

El número de filas representa el número de posibles estrellas candidatas y el número de columnas representa las estrellas con las que se está comparando la distancia, por ejemplo, si se busca la estrella 1 de la imagen por medio de su distancia con la estrella 2, es decir la distancia D1-2, el número de filas representa las posibles estrella 1 y el número de columnas representa las posibles estrella 2.

Las distancias del catálogo indexado que se encuentren dentro del rango asignado a la primera distancia medida producen la primera reducción en el número de columnas del catálogo, solo estas estrellas serán incluidas en la búsqueda de la siguiente distancia relacionada con la primera estrella. El proceso continúa así hasta haber comparado todas las distancias relacionadas con la primera estrella o hasta haber encontrado un único acierto.

Si al finalizar esta primera etapa no se ha conseguido un acierto, se continúa la búsqueda, esta vez, con las distancias relacionadas con la segunda estrella. A diferencia del proceso inicial, la base de datos utilizada no es la configurada inicialmente, sino que es un catálogo reducido en el número de columnas, aprovechando el hecho de que se cuenta con un menor número de candidatas a estrella 1, (dado que la búsqueda en esta etapa inicia con la distancia de la estrella 2 con la estrella1), mientras que el número de filas es igual al de la base

de datos inicial, ya que cualquier estrella en este punto puede ser candidata a estrella 2 como se muestra en la figura 57.

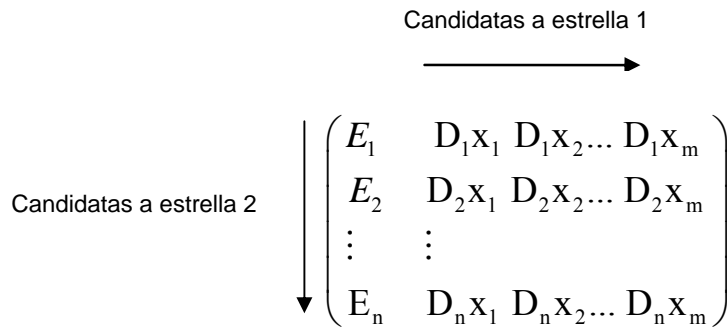


Figura 57 Búsqueda de la estrella 2

Fuente: Autores.

Una vez superada esta etapa, el proceso se repite de igual manera que en la etapa anterior, el cual arrojará como resultado x estrellas candidatas a estrella 2.

Cuando se compara la distancia entre la estrella 2 con la tercera estrella de la imagen, es decir, buscar la distancia D2-3, el catálogo inicial es reducido en el número de filas, tomando **sólo** las x candidatas a estrella 2, resultantes de la anterior comparación, es decir el resultado de la búsqueda D2-1.

Debido a que la estrella 3 no tiene candidatas preliminares (aún no se han analizado las distancias de la estrella 3 con el resto), se toma la totalidad de las columnas de la base de datos configurada inicialmente.

Se continúa así hasta conseguir un acierto. Si tras haber efectuado la búsqueda con todas las estrellas de la imagen, no se ha llegado a obtener un acierto, se procede con esta búsqueda hasta conseguir una única estrella candidata o hasta efectuar el proceso con todas las distancias disponibles.

Cabe resaltar que a medida que se van efectuando las búsquedas, la reducción del catálogo donde se busca es cada vez mayor, consiguiendo que cada ciclo se ejecute a mayor velocidad y con más posibilidades de llegar a una única respuesta. El proceso general de búsqueda se ilustra en la figura 58.

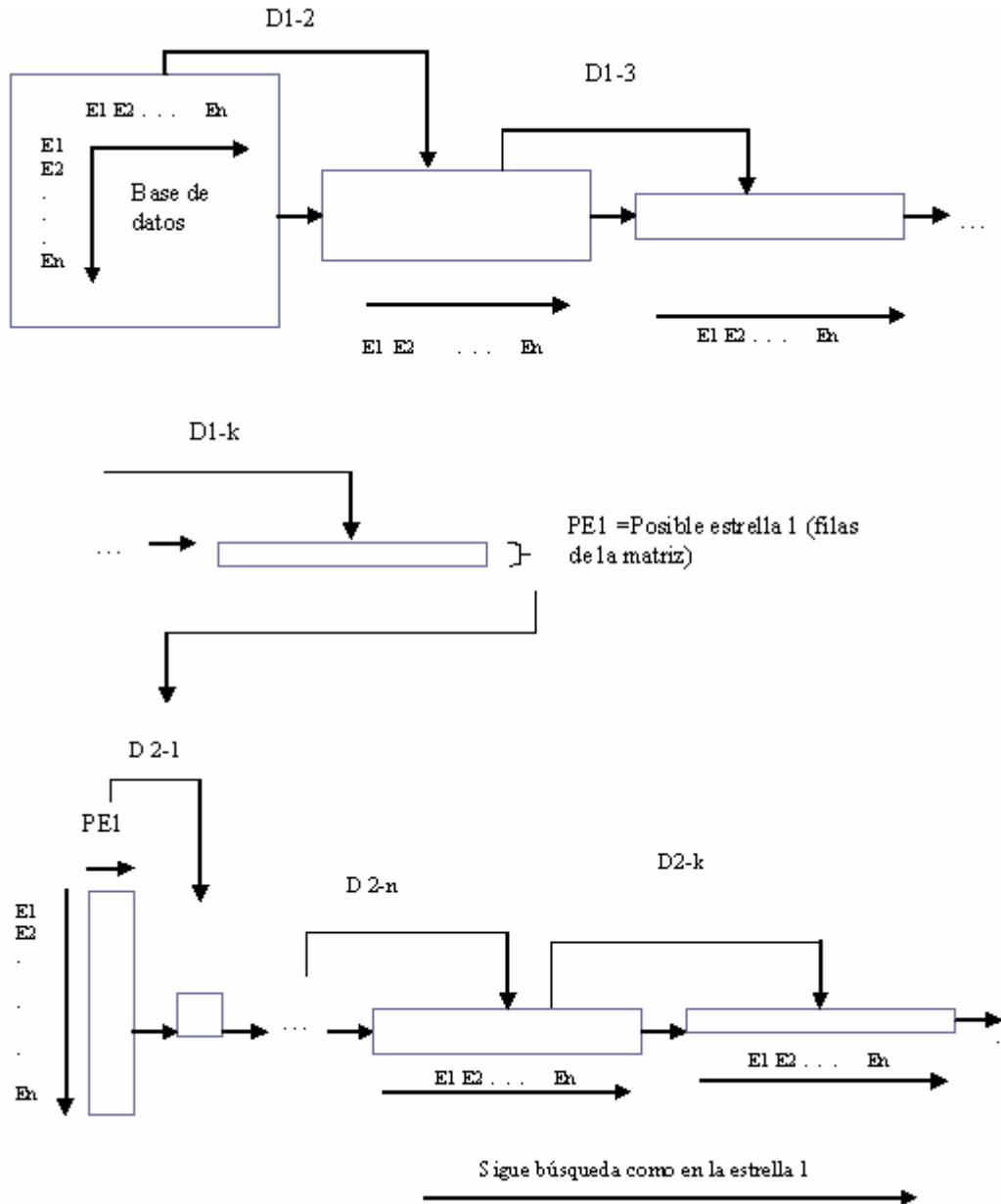


Figura 58 Ejemplo de búsqueda

En este caso para las estrellas 1 y 2. La secuencia sigue hasta tener un único resultado o hasta barrer con todas las estrellas presentes en la imagen. D_{m-n} ubicada sobre las flechas indican la búsqueda que está siendo efectuada.

Fuente: Autores.

Finalmente hay que decir que si bien estadísticamente siempre existe la probabilidad de encontrar más de dos estrellas que compartan un rango de distancias, esta probabilidad va a tender a cero, si en lugar de una sola distancia, se relacionan una serie de distancias.

En pocas palabras se concluye que entre mayor sea el número de estrellas registradas en la imagen, mayor es la probabilidad de acierto.

Al tener una estrella con coordenadas definidas, se inicia una segunda etapa de búsqueda, esta vez con la estrella encontrada como única fila de búsqueda en el catálogo, para encontrar las coordenadas de las otras estrellas de la imagen.

Una vez se ha concluido la etapa de identificación, se procede a realizar un ajuste de coordenadas, realizado por medio de la ecuaciones (24), (25) y (26), las cuales brindan la posibilidad de determinar las coordenadas en AR y Dec, sobre un punto de coordenadas XY sobre la imagen. Esta opción solo está disponible, si el sistema detecta las coordenadas de tres o más estrellas.

4.5.3 Seguimiento

El algoritmo de seguimiento fue desarrollado con base en la detección del movimiento del centroide⁴¹ de una estrella presente en la imagen.

Este método fue aplicado, dado que en la observación astronómica, el objetivo se mueve al igual que su entorno, desde el punto de referencia del observador, a una misma velocidad y dirección.

Debido a que el campo de visión manejado es relativamente pequeño⁴² en relación con otras escenas en las que se realiza seguimiento, como lo son algunos

⁴¹ Por medio del método del centro de masa.

⁴² Aproximadamente 3.5°.

procesos industriales, es necesaria una rápida detección y posterior corrección, para no perder los objetos de la escena.

Inicialmente se planteó el uso de un movimiento predictivo, en el cual, un par de tomas iniciales describen el movimiento del objeto a seguir; a causa de la variación aleatoria de la posición de los centroides, producto del “centelleo” propio de las estrellas, es necesario realizar las capturas de retroalimentación a intervalos de tiempo continuos, para así lograr un comportamiento predictivo satisfactorio.

Inicialmente se ajustó este tiempo a 5 segundos, pero se presentó un desplazamiento indeseado de la estrella para el usuario, haciendo que el objetivo se saliese del sitio designado.

Se concluyó que la predicción debía ser corregida constantemente, pues con la aproximación de la trayectoria curva de las estrellas en el cielo a una recta, se introducían errores acumulativos.

Por estas razones se decidió no utilizar el método predictivo, pero a cambio se implementó un método de seguimiento por el cual la corrección se lleva a cabo en intervalos de un segundo, con ajustes más suaves y menos perceptibles que en el caso anterior.

El proceso de seguimiento se inicia al tener una imagen del sensor estelar con una estrella determinada, posteriormente se procede a preprocesar la imagen con las técnicas descritas en el algoritmo de detección.

Cuando se ha eliminado la mayor parte del ruido, la imagen es binarizada con los mismos parámetros utilizados en el proceso de detección, una vez superado esta etapa, se halla el centroide de la primera estrella presente en la escena a seguir.

En este momento del proceso, se tiene la información de la imagen que se desea mantener, con lo cual se procede a centrarla siempre en este punto, mientras el seguimiento esté activado.

Para iniciar la activación de los motores del telescopio, se espera un tiempo de 1 segundo, en el cual, el movimiento de las estrellas presentes en la imagen sea detectado por el sensor estelar.

Cuando este tiempo ha transcurrido, se captura una segunda imagen, la cual pasa por un pre-procesamiento igual al de la primera imagen y una vez hallado su centroide, se compara con el obtenido inicialmente, para así conocer el sentido del movimiento registrado.

Conociendo la resolución del sistema, este movimiento es transformado de píxeles a segundos de grado, con lo cual se determina la distancia recorrida, dado que el tiempo transcurrido es previamente conocido, es posible hallar la velocidad respectiva.

El telescopio Meade, permite el control de 3 velocidades a través del computador las cuales son:

- 0.004 °/s
- 0.27 °/s
- 6.5 °/s

Con estas tres velocidades, el programa decide cuál de ellas utilizar y por cuanto tiempo, basado en la velocidad de desplazamiento de la estrella sobre el registro del sensor. Además si se considera pertinente, se involucran dos velocidades para un mejor control.

El sentido del movimiento en cada uno de los ejes está dado por la diferencia de los dos centroides obtenidos de las imágenes.

Debido a la carencia de un rango continuo de velocidades, el control de los motores se logra en dos intervalos (cada uno de medio segundo), permitiendo una corrección mas suave y menos notoria para el usuario.

El control del seguimiento es descrito en la figura 59, en donde el diagrama de bloques permite observar la retroalimentación presente en el proceso por medio de las imágenes adquiridas por el sensor estelar

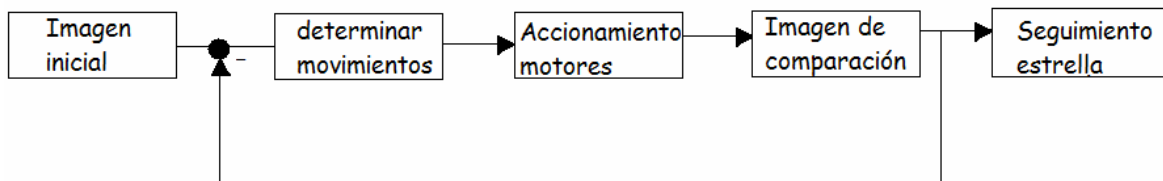


Figura 59 Diagrama de bloques del control del seguimiento.

Fuente: Autores.

4.5.4 Modo GoTo

Esta función tiene como fin centrar el instrumental hacia una estrella o cualquier punto de la imagen.



Figura 60 Diagrama de flujo Goto

Fuente: Autores.

En la figura 60, se muestra el diagrama de flujo del modo Goto.

El proceso inicia con la captura de la imagen que contiene la estrella que se desea centrar. Esta imagen sufre los procesos de reducción de ruido ya descritos en los anteriores pre-procesamientos.

Una vez obtenida la imagen, el usuario selecciona la estrella a seguir, entregando así los puntos XY de la imagen a centrar. La determinación de la corrección del movimiento se lleva a cabo teniendo en cuenta el tamaño de la imagen y la resolución del sistema.

Dado que la velocidad de los motores está definida en grados y no en píxeles, se hace necesaria una conversión de píxeles a grados, para determinar el tiempo en el que debe ser ejecutada la acción.

4.5.4.1 Control del telescopio

Como ya se ha mencionado, el telescopio cuenta con un puerto serie y un set de instrucciones con los cuales es posible el control del sentido y velocidad de sus motores.

Este control se realiza desde la interfaz gráfica y le permite al usuario escoger entre tres velocidades, además del sentido de giro de los motores. Es posible el movimiento simultáneo en los sentidos norte-este, norte-oeste, ó, sur-este y sur-oeste. El usuario también puede disponer del momento de detención de los motores.

El diagrama de flujo de este control se puede observar en la figura 61

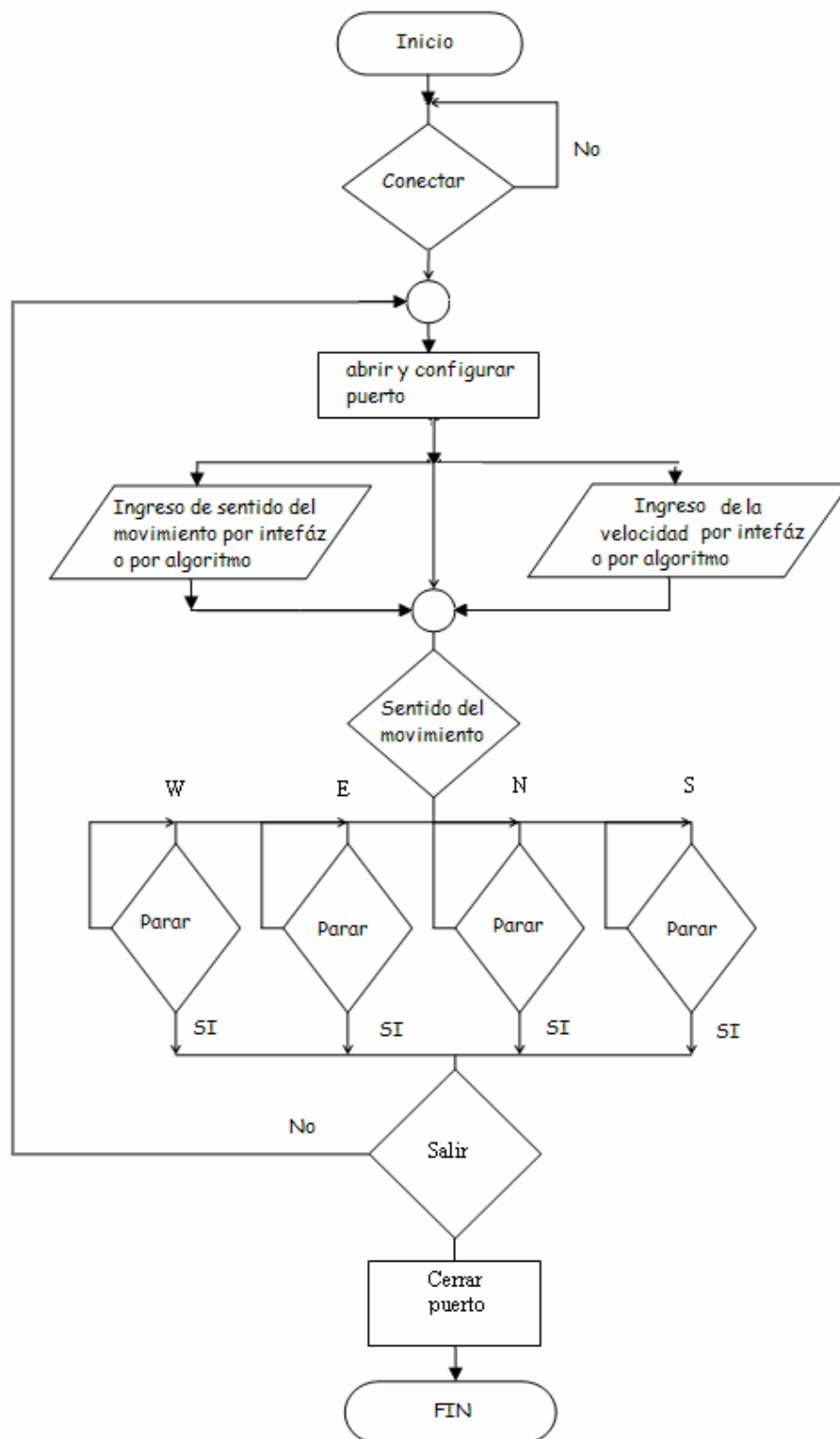


Figura 61 Diagrama de flujo del control de los motores del telescopio.

Fuente: Autores.

5 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.1 Descripción de las pruebas

Las pruebas realizadas se llevaron a cabo con 105 imágenes adquiridas de un software de astronomía, el cual permite simular el cielo para cualquier fecha y lugar sobre la superficie terrestre, además se pueden controlar parámetros tales como el campo de visión y limitar la cantidad de estrellas visibles de acuerdo a una magnitud dada por el usuario.

Estas imágenes fueron obtenidas gracias a que el software permite exportar imágenes de cualquier punto de la esfera celeste, las cuales se almacenan en disco con alguno de los formatos de compresión más usados, para el caso de las simulaciones, se almacenaron las imágenes como archivos *.jpeg.

El simulador entrega las coordenadas de las estrellas visualizadas y sus valores de magnitud; dado que es un programa, en él no influyen los factores externos que afectan a las observaciones reales, como el clima, por esto es posible la realización de pruebas en cualquier momento.

Al momento de adquirir las imágenes, se establecieron las coordenadas de latitud y longitud de la ciudad de Bucaramanga (Colombia) y se seleccionaron las imágenes de tal forma que se obtuvo una distribución uniforme a través de toda la esfera celeste, todas fueron capturadas bajo las mismas condiciones, conservando el mismo campo en cada una de ellas (5°). Además, las imágenes adquiridas presentan diversas densidades de estrellas por grado cuadrado, con lo que se realizó un mejor análisis de los resultados.

A continuación se presenta el análisis obtenido con base en los resultados de estas pruebas.

5.2 Aciertos y Errores.

Al realizar una reducción astrométrica con el software **OEIL 1.0**, siempre se llega a uno de los siguientes casos:

- Caso 1: El número de coincidencias es alto, por lo que el algoritmo no consigue una única respuesta. En este caso el software no entrega resultados, en cambio envía un mensaje de advertencia.
- Caso 2: Las coordenadas de las estrellas entregadas por la interfaz **no** corresponden a las coordenadas verdaderas de las estrellas presentes en la imagen. En este caso se dice que hubo un acierto, pero no hubo respuesta correcta.
- Caso 3: Las coordenadas entregadas corresponden a las de las estrellas de la imagen. Este es el caso ideal buscado con este proceso y es presentado como respuesta correcta.

En la figura 62 se aprecia el histograma correspondiente a los resultados de las simulaciones (fallo, acierto, respuesta correcta) con las 105 imágenes, mostrando el comportamiento de los resultados según la cantidad de estrellas presentes en la imagen.

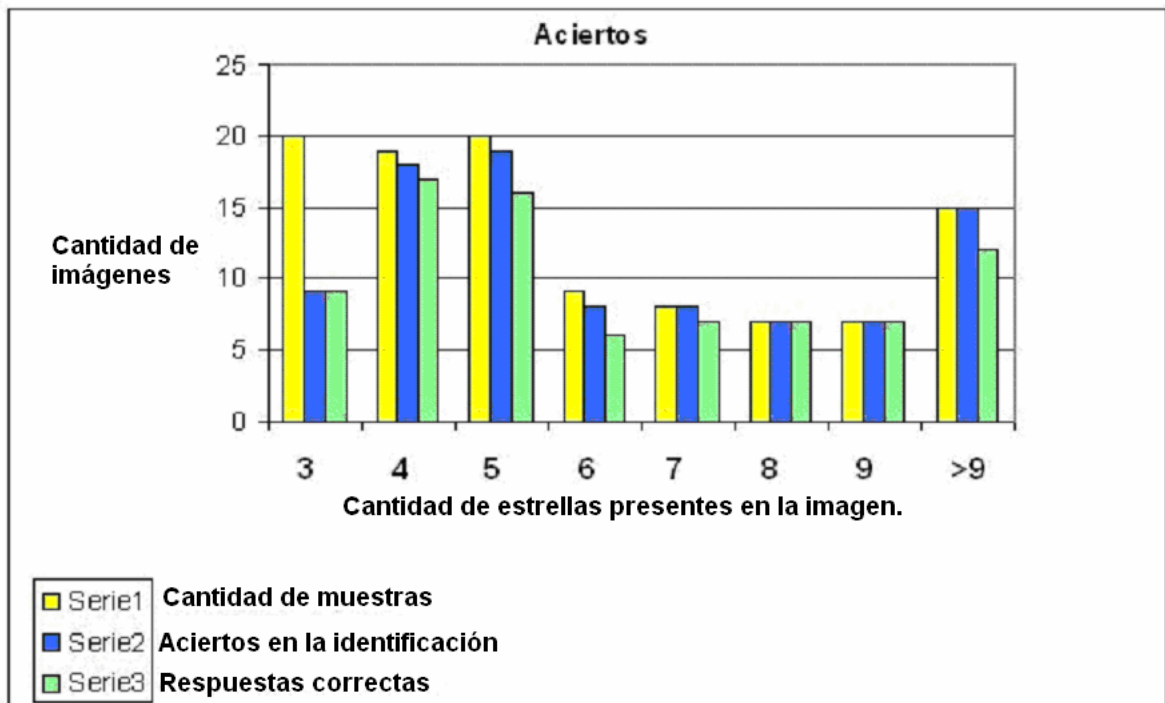


Figura 62 Histograma de aciertos.

Fuente: Autores.

Las barras amarillas representan el número de imágenes con las que cada prueba fue realizada, la barra azul corresponde a la información de las imágenes que el software presenta como aciertos, mientras que las barras rojas, indican las respuestas correctas, obtenidas por **Oeil 1.0**.

Estos resultados se pueden apreciar con más detalle en la tabla 8.

Número total de muestras: 105

Número total de aciertos del Programa: 91

Número total de respuestas correctas: 81

Porcentaje de respuestas correctas:= 77.14% de efectividad.

Porcentaje de error entre los aciertos del programa y respuestas correctas = 11%

Tabla 8 Estrellas – aciertos

Cantidad de estrellas en la imagen	3	4	5	6	7	8	9	más de 9
Cantidad de muestras	20	19	20	9	8	7	7	15
Aciertos	9	18	19	8	8	7	7	15
Respuestas correctas	9	17	16	6	7	7	7	12
Porcentaje de respuestas correctas	45%	89.47%	80%	66.67%	87.5%	100%	100%	80%
Error entre aciertos y respuestas correctas	0%	16%	16%	25%	12.5%	0%	0%	20%

Como se puede observar, el comportamiento de los aciertos varía según la cantidad de estrellas presentes en la imagen. Al tener tan solo tres estrellas, el algoritmo cuenta con pocas opciones de comparación, por esta razón, este es el caso en el que se presentan menor cantidad de aciertos. Aunque el sistema tiene como requisito que por lo menos estén presentes tres estrellas en la imagen, es altamente recomendado contar con un número más elevado para poder contar con mayor probabilidad de acierto.

Los resultados muestran la tendencia de obtener respuestas correctas, a medida que aumenta el número de estrellas presentes en la imagen. Esta tendencia presenta una variación en el caso de seis estrellas y se debe al tipo de imágenes con las que se trabajó. En estas imágenes las estrellas se encontraban concentradas en una sola región, presentando una relación de distancias pequeña

en comparación con el tamaño de la imagen, que junto con el rango de tolerancia, lograba una alta tasa de coincidencias en las condiciones tratadas.

En el caso de las imágenes de más de 10 estrellas, algunas fueron tomadas de la misma constelación, debido a que en la esfera celeste hay pocas regiones donde en un campo menor a 5° se encuentren más de 10 estrellas de magnitud menor a 6V. Esta razón influyó en los resultados, ya que el programa encontró para algunas de las imágenes, varias coincidencias en las distancias, generando un error que se propagó en el análisis de las imágenes pertenecientes a la misma constelación.

5.3 Tiempos de Ejecución.

En la figura 63 se puede apreciar el valor medio en los tiempos de ejecución del programa.

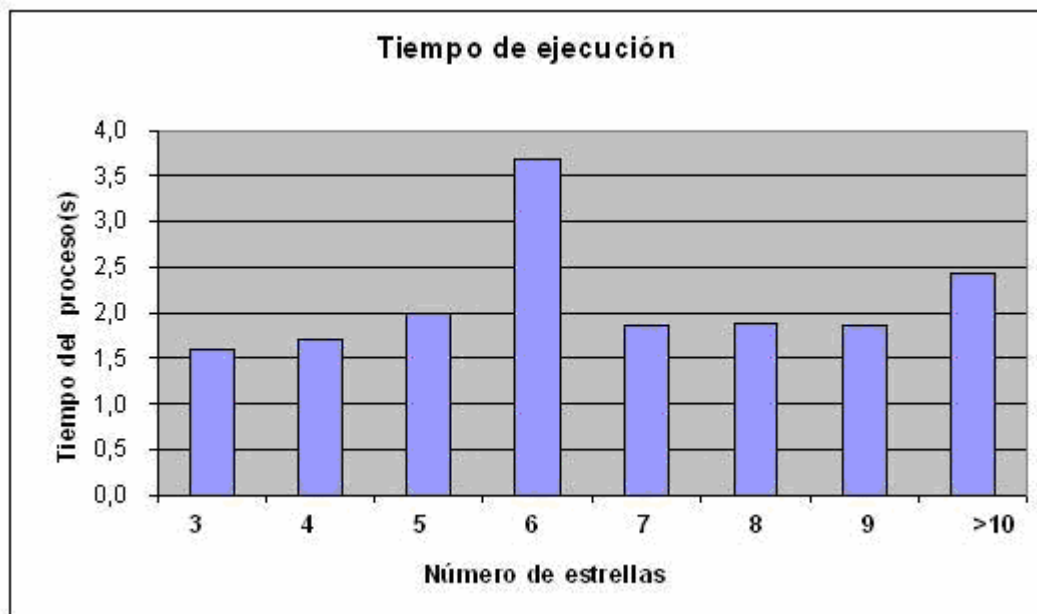


Figura 63 Histograma de la media de los tiempos de ejecución

Fuente: Autores.

El comportamiento de los tiempos de ejecución, concuerda con los resultados de acierto ya analizados. Los mayores tiempos de ejecución coinciden en las imágenes con mayores porcentajes de error entre *aciertos* y *respuestas correctas*. Esta situación se presenta, debido a las características propias del algoritmo, en las que un alto grado de coincidencias requiere una búsqueda más exhaustiva con manejo de matrices de mayores proporciones lo que se traduce en ciclos de búsqueda más extensos.

La tabla 9 contiene los valores medios, mientras la tabla 10 muestra las varianzas en los tiempos de ejecución de los diferentes algoritmos involucrados en la identificación (detecta, identifica y error), así como el tiempo total. Todo se encuentra especificado según la cantidad de estrellas presentes en la imagen, la precisión en los datos es de doble punto flotante.

Tabla 9 Media de los tiempos de ejecución

# estrellas	3	4	5	6	7	8	9	>9	Media
T detecta	0,31411	0,4375	0,40874	0,44037	0,4825	0,491	0,50886	0,58113	0,45803
T Identifica	1,06580	1,21360	1,57140	3,23610	1,35940	1,37930	1,35060	1,85950	1,6295
T error	0,22744	0,065444	0,011474	0,01763	0,00975	0,009	0,0044286	0,0062	0,043921
T total	1,60730	1,71660	1,99160	3,69410	1,85160	1,87930	1,86390	2,44680	2,1314

Tabla 10 Varianza de los tiempos de ejecución

# estrellas	3	4	5	6	7	8	9	>9
T detecta	0,49332	0,22294	1,00800	2,73630	0,15476	0,06212	0,10904	1,85950
T Identifica	0,11505	0,17104	0,026698	0,03195	0,04916	0,012288	0,0083	0,07897
T error	0,40279	0,11581	0,011472	0,01953	0,01157	0,0084261	0,00757	0,01275
T total	0,57971	0,30292	1,00400	2,73880	0,12681	0,05579	0,11385	1,01240

Estas pruebas fueron realizadas con la configuración de un catálogo de campo de visión de 5 grados y una magnitud visual mínima de 6V.

El tiempo de ejecución del error, es el tiempo utilizado por el programa para estimar el valor de la media y la varianza del error del ajuste de coordenadas.

La escogencia del catálogo influye en los tiempos de ejecución del programa. Entre mas cercanos sean a los parámetros de la imagen (campo de visión y magnitud estelar mínima), el proceso podrá ejecutarse a una mayor velocidad.

Esta situación puede observarse en los datos entregados por la tabla 11, en donde una imagen con tres estrellas, capturada por el sensor estelar, es identificada utilizando diferentes catálogos.

Tabla 11 Tiempos de ejecución para diferentes catálogos

Catálogo	T detección	T identificación	T error
campo 5 mag6	0,276	2.781	0,125
campo 5 mag5	0,265	0,172	0,11
Campo 4 mag5	0,235	0,172	0,109
Campo 3,5 mag5	0,234	0,187	0,109
campo 6 mag4	0,235	0,031	0,125
campo 6 mag3	0,234	0,032	0,094
campo 6 mag 2,5	0,25	0	0,11

Como se puede apreciar, la mayor variación se presenta en el tiempo de identificación, donde se usa el catálogo indexado para determinar las coordenadas de las estrellas presentes en la imagen, entre más grande sea este catálogo, más tiempo de búsqueda será necesario. Por otro lado, el factor más influyente en la reducción del tiempo de ejecución es la determinación de la máxima magnitud del catálogo.

El indexado del catálogo es un proceso que ha sido altamente optimizado en cuanto al tiempo de ejecución y tamaño del archivo generado, como se verá en las conclusiones estas mejoras fueron obtenidas específicamente por la plataforma de

programación. A continuación se presenta una tabla con los tiempos de ejecución en el indexado de una serie de catálogos, todos con un campo de visión (FOV) igual a 5°, solo que se ha variado es el valor de la magnitud estelar mínima, desde magnitud 6, hasta magnitud 0. En la tabla 12 y en la figura 64 se aprecian los resultados obtenidos.

Tabla 12 Tiempos de ejecución para un FOV de 5°

FOV (°)	Magnitud visual	Tiempo de ejecución indexando (s)	Tiempo guardando el archivo en disco (s)
5	6	9,27	0,075
5	5	6,531	0,047
5	4	1,14	0,04
5	3	0,282	0,047
5	2	0,094	0,016
5	1	0,062	0,032
5	0	0,031	0

Indexado con FOV de 5°

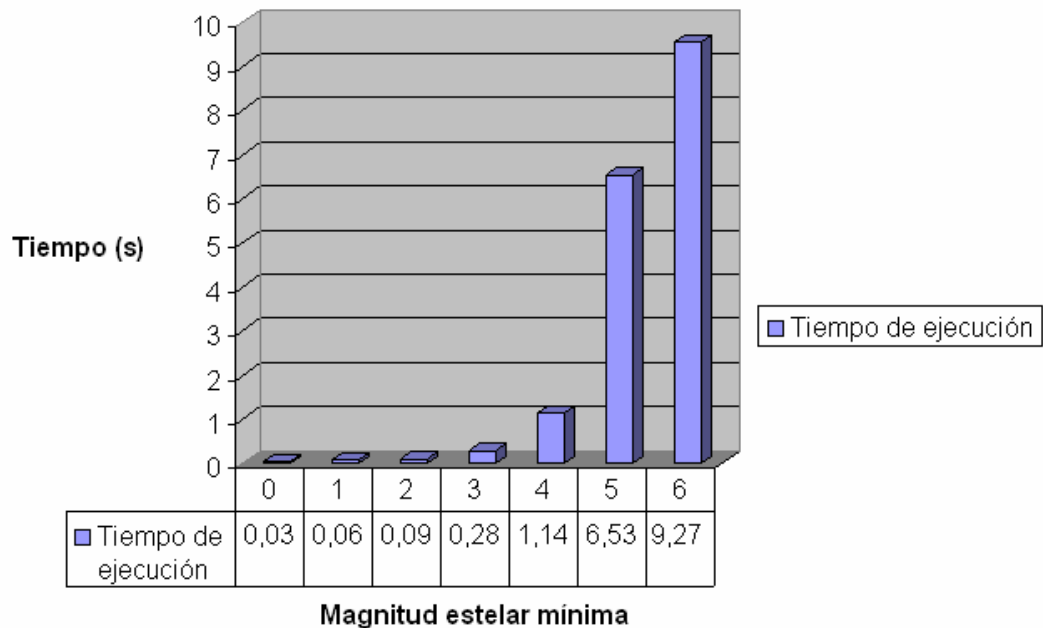


Figura 64 Tiempos de ejecución para un FOV de 5°

Fuente: Autores.

6 CONCLUSIONES.

6.1 Verificación de Objetivos.

- En el proyecto se desarrolló un prototipo de un sistema de control visual que permite la identificación de las coordenadas de apuntamiento de las estrellas presentes en una imagen estelar, utilizando conceptos y técnicas propias de la astrometría y del tratamiento digital de imágenes estelares.
- Para obtener las imágenes estelares se realizó el diseño y mecanizado de un sensor estelar que se acopla al telescopio en modo “piggy back” y permite realizar capturas dinámicas de la zona de apuntamiento del telescopio, las cuales son entregadas al software de control.
- Este sistema cuenta con una interfaz gráfica, llamada **OEIL 1.0**, la cual fue implementada bajo el entorno de Matlab 7.0®, la relación usuario-máquina se facilita gracias al uso de la programación orientada a objetos, dicha programación se complementa con una serie de diferentes mensajes de ayuda fijos y emergentes, además de un manual de usuario y una ayuda on-line, la cual permite el acceso a la página oficial del proyecto, que reside en el servidor del Centro Halley de Astronomía y Ciencias Aeroespaciales de la Universidad Industrial de Santander.
- La interfaz maneja internamente una serie de algoritmos desarrollados específicamente para cumplir con las rutinas de captura, preprocesado de señal, segmentación, identificación y seguimiento, las cuales son transparentes al usuario.
- El software OEIL 1.0 realiza el control de los movimientos del telescopio Meade a través del puerto serie, para esto se implementaron las rutinas de

seguimiento, el manejo del movimiento del telescopio desde la interfaz y la opción de *GOTO* sobre cualquier punto de la imagen. Otra serie de módulos implementados incluyen la configuración inicial del sensor estelar, un módulo de control de velocidad y movimiento del telescopio, la activación de video en tiempo real y la captura de imágenes o video.

- Además de los objetivos fijados, se realizaron una serie de optimizaciones a la interfaz, las cuales permitieron ampliar las metas propuestas. Dentro de estos módulos se destacan el módulo de creación y configuración de catálogos estelares, creación de cartas celestes, algoritmo de control de memoria para capturar video, activación de visión nocturna, módulo de almacenamiento en memoria de los resultados obtenidos, ayuda por medio de un manual de usuario, ayudas emergentes y ayuda on-line.

6.2 Aplicaciones Directas del Proyecto

- El hecho de ser la primera tesis de pregrado realizada en la Universidad Industrial de Santander en torno a la instrumentación en astronomía y astrofísica, la aplicación principal de este sistema, se encuentra enfocada precisamente hacia el desarrollo de nuevas tecnologías en tan importante área de la ciencia.
- El aporte inmediato que se brinda a la comunidad en general, es la implementación de este sistema en el control del telescopio principal del observatorio astronómico de la Universidad Industrial de Santander⁴³.

⁴³ Al momento de escribir estas líneas, el observatorio se encuentra en la fase final de su construcción.

- Este proyecto contiene una serie de expansiones, las cuales permitirán el desarrollo de herramientas para el estudio de la astronomía en la Universidad Industrial de Santander, ratificando al Centro Halley de Astronomía y Ciencias Aeroespaciales y por ende a la UIS, como una de las cabezas visibles en la investigación de la astronomía en Colombia.

6.3 Acerca de Matlab 7.0®

- El manejo de matrices de Matlab 7.0® ha sido una importante herramienta para el desarrollo del presente proyecto, con la implementación de matrices tipo *sparse* se han optimizado los procesos de indexado e identificación, lo cual se traduce en una ejecución más rápida de los algoritmos y un menor uso de memoria en el almacenamiento de bases de datos.
- El uso del ambiente gráfico de matlab 7, permite una sencilla implementación de la programación orientada a objetos y facilita la expansión del proyecto, con la creación de nuevos módulos.

6.4 Acerca del sensor estelar

- Para un mejor desempeño del sistema, es recomendable utilizar un sensor estelar con mayor sensibilidad y resolución, lo cual permitirá la detección de cuerpos celestes de menor magnitud, generando registros que ocuparán mayor área del sensor e incrementarán la precisión en los datos.
- La escogencia del lente del sensor fue muy importante en el diseño del sistema, la selección de parámetros como la distancia focal y la apertura seleccionada, permitió obtener un valor de resolución de

35.665 ± 0.001 ["/pix], suficiente para probar la eficacia del sistema, es de resaltar también que gracias a la calidad de la óptica seleccionada no fue necesario realizar una corrección a la aberración esférica del lente.

6.5 Recomendaciones y observaciones

- 🔍 El telescopio Meade LX-90 posee un sistema de control muy eficiente, gobernado por un microcontrolador, quien es el encargado de interactuar directamente con los servomotores y sintonizar todo el sistema, por medio del ajuste de ganancia y control del lazo de retroalimentación. Por esta razón, el sistema de control implementado no implica la modificación de estos parámetros y se limita al envío de las respectivas señales de control, por medio del puerto serial.
- 🔍 En cuanto al algoritmo de seguimiento se recomienda implementarlo sobre un telescopio con montura ecuatorial, la cual requiere del accionamiento de un único eje a una velocidad continua y no del control de dos ejes a velocidades variables (caso de las monturas azimutales); esto se traduciría en una disminución del error en el seguimiento.
- 🔍 A través del puerto serie, el usuario del telescopio Meade LX-90 puede acceder al control de tan solo 3 velocidades. Para que el algoritmo de seguimiento se ejecute de forma eficiente, se requiere de mayor grado de libertad al manipular y controlar las velocidades de los servomotores, para esto se sugiere implementar el sistema de control desarrollado sobre la montura de un telescopio Meade LX-200, la cual permite el control sobre un rango continuo de velocidades y no sobre un rango discreto de 3 velocidades.

🌐 Como continuidad directa de este proyecto, se propone la realización de la segunda fase de este, la cual considera el diseño e implementación del sistema de captura y procesamiento de las imágenes provenientes una cámara CCD de altas prestaciones, la cual será acoplada directamente sobre la óptica del telescopio. Este proyecto requiere una escogencia adecuada del sensor y el desarrollo de un completo módulo de procesamiento de imágenes estelares, que será integrado a la interfaz **OEIL 1.0**.

🌐 Finalmente, para continuar con el desarrollo de proyectos relacionados con la instrumentación astronómica, se requiere que el Centro Halley de Astronomía mantenga la vinculación de estudiantes pertenecientes a las facultades de ciencias básicas y de ingenierías físico mecánicas/químicas, quienes complementaran sus conocimientos, en pro de la obtención de nuevas herramientas para el estudio de la astronomía y astrofísica.

7 BIBLIOGRAFÍA.

[1] PORTILLA José Gregorio. Elementos de Astronomía de Posición, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2001.

[2] PRADA Blanca Inés et al. Somos Ciudadanos del Cosmos, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2004.

[3] <http://www.mapug-astronomy.net/ragreiner/ControlSystems.html#Top>

[4] PORTILLA José Gregorio et al. Astronomía para todos, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá 2001.

[5] MALLAMA Anthony. Automation of a commercial astronomical telescope, Publications of the astronomical society of the pacific #108 pags 110-111, 1996 January.

[6] MEJÍA Jorge et al. The CCD stellar sensor of the MASCO telescope pointing system, Adv Space Res, vol 26 No 9, pags 1407-1410. Ed Elsevier science Ltd. 2000.

[7] ZENICK Ray, McGuire Thomas. Lightweight, Low Power Coarse Star Tracker, 17th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites. 2003.

[8] JØRGENSEN John, PICKLES Andrew. Fast and Robust Pointing using a second generation Star Tracker, SPIE 3351, 07 (1998).

[9] MORTARI Daniele, ROMOLI Andrea. StarNav III: A Three Fields of View Star Tracker, IEEEAC paper #050, 2001

[10] CLARK Natalie et al. Intelligent Star Tracker. 14th Annual/USU Conference on Small Satellites, Air Force Research Laboratory, Kirtland AFB NM 87117, Reference No: SSC00-III-1 Session: III Advanced Sensor Concepts.

[11] FOSUA C et al, DETERMINATION OF CENTROID OF CCD STAR IMAGES University FAF Munich Germany, Commission III, WG III/8.

[12] GONZÁLEZ, R.C., WINTZ P. (1987); Digital image processing. Addison Welsley Publishing Co.

[13] SAMAAN Malak, Toward master and more accurate star tracker sensor using recursive centroiding and star identification, Dissertation Proposal Submitted to the Office of Graduate Studies of Texas A&M University, 2002.

[14] HARVEY Chris, New Algorithms for Automated Astrometry, thesis submitted to the Graduate Department of Computer Science of the University of Toronto, 2002.

[15] SHAMIR Lior, NEMIROFF Robert, Using fuzzy logic for automatic analysis of astronomical pipelines, Michigan Technological University.

[16] GALADÍ David et al. Manual práctico de astronomía con CCD. Ediciones Omega, Barcelona, España.

[17] TATUM J. B. Ph.D, Celestial Mechanics. Web resources of the University of Victoria, Department of physics and astronomy.
<http://orca.phys.uvic.ca/%7Etatum/index.html>

[18] <http://almaak.tripod.com/asasac/astrofotografia.htm>

- [19] RUIZ, Alberto. Sistemas de Percepción Visión por Computador. Universidad de Murcia, departamento de informática y sistemas.23 de septiembre de 2004.
- [20] MOLINA,R. Introducción al procesamiento y análisis digital de imágenes digitales. Universidad de Granada. Departamento de ciencias de la computación e I.A.
- [21] <http://www.pcfoto.com/repormar03-2.html>
- [22] <http://www.f22mx.com/pages/infotecnica/revelador-revela.html>
- [23] <http://es.wikipedia.org/wiki/CCD>
- [24] <http://www.astroclub.net/mercure/aav/bol12/12camccd.htm>
- [25] <http://www.nto.org/curso/intro.html>
- [26] <http://es.wikipedia.org/wiki/Astron%C3%A1utica>
- [27] <http://www.monografias.com/trabajos6/auti/auti.shtml>
- [28] http://www.meade.com/lx90/lx90_specs.html
- [29] <http://m1.aol.com/kewtasheck/specific.html>
- [30] <http://www.mathworks.com>
- [31] AYRES F, trigonometría plana y esférica, Mc Graw-Hill 1967.
- [32] <http://www.arrakis.es/~astsafor/astccd/astrometria.html>

8 APÉNDICE Y ANEXOS.

- Manual del Usuario de Oeil 1.0.
- Set de Instrucciones del Meade.
- Cotización Nikon D70.
- Planos estructurales del sensor estelar.
- Cotización primer diseño del sensor estelar.

ANEXO A MANUAL DEL USUARIO OEIL 1.0

OEIL 1.0 es un software desarrollado para la identificación de coordenadas estelares y seguimiento de estrellas definidas por el usuario. Todos los algoritmos han sido desarrollados bajo una interfaz gráfica en el entorno de Matlab 7.0®

A continuación se presenta un manual que explica el manejo de las diferentes herramientas desarrolladas en el software.

A.1 REQUERIMIENTOS COMPUTACIONALES

A.1.1 MATLAB 7.0® (R14)

El sistema está desarrollado bajo en entorno de MATLAB 7.0® (R14), el cual es un entorno de cómputo científico cuyo lenguaje está enfocado al manejo matricial; contiene una serie de librerías o *toolboxes* especializados, entre los cuales se encuentran adquisición de imágenes, procesamiento de imágenes, control de instrumentos, quienes permiten un fácil y eficiente manejo de variables presentes en el proyecto, además del modulo de programación orientada a objetos **GUI**.

Matlab 7.0 presenta una versión mejorada en el manejo de interfaz gráfica, las cuales permiten un manejo más práctico de funciones además de nuevas herramientas de trabajo, un manejo más eficiente de puertos que permite una mejor identificación, configuración y comunicación con instrumentos. Igualmente posee un *mapping toolbox* más completo, el cual permite opciones de visualización para funciones vectoriales, imágenes georeferenciadas y cuadrículas de datos en las coordenadas de los mapas proyectados, entre otras ventajas sobre versiones anteriores.

Además de las ventajas en cuanto al uso de *toolboxes* especializados, el enfoque del lenguaje es de gran importancia en el desarrollo del proyecto, ya que el eficiente manejo de cálculo de matrices es altamente manejado en el proyecto, no solo por el tratamiento de grandes bases de datos, sino por el procesamiento de imágenes a modo de matrices.

Para la ejecución del software del presente proyecto, MATLAB® 7 (R14). Presenta los siguientes requerimientos:

Toolbox de MATLAB® necesarios:

Instrument control toolbox, Image acquisition toolbox, Image processing toolbox, Mapping toolbox

A.1.2 Requerimientos específicos del PC:

Para la conexión del sensor estelar:

Puerto USB disponible.

Para la conexión del telescopio:

Puerto serial disponible.

Memoria RAM:

256 MB (mínimo)

512 MB (recomendado)

Sistemas operativos soportados por MATLAB® 7 [6]:

- Windows: Windows XP, Windows 2000(service Pack 3 o 4),Windows NT 4.0 (service pack 5 o 6a).
Pentium III o superior; AMD Athlon o superior.

A.2 INICIAR OEIL 1.0

Para ejecutar el software, es necesario copiar la carpeta OEIL con todos sus componentes, a la carpeta de trabajo de Matlab 7.0®. Una vez copiados los archivos, digite en Matlab 7.0® la palabra “oeil”, con lo que se visualizarán la ventana de inicialización (figura 65) y posteriormente la ventana principal del programa (figura 66):



Figura 65 Ventana de inicialización

Fuente: Autores.

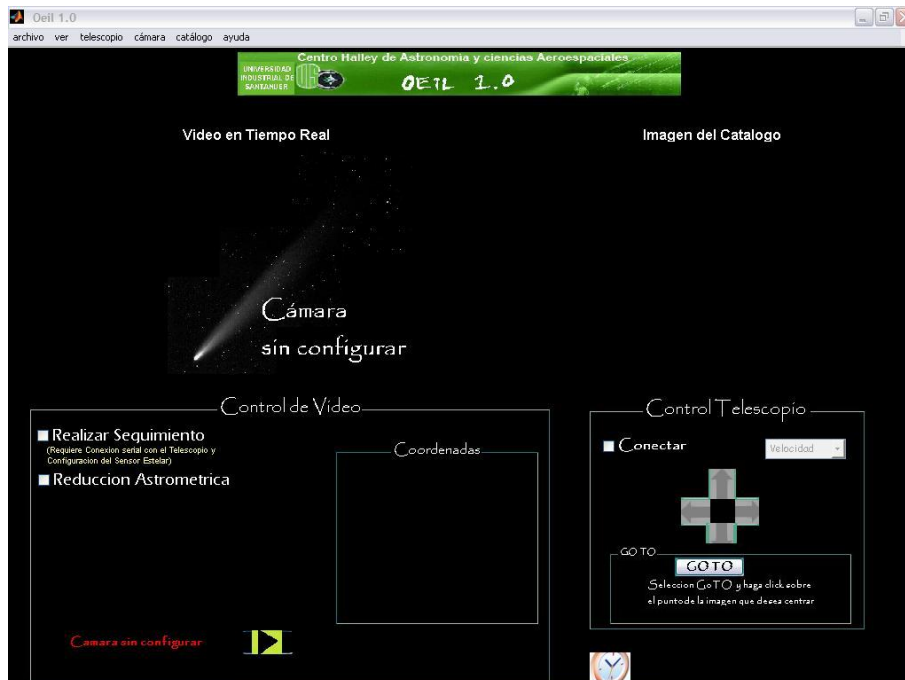


Figura 66 Ventana principal

Fuente: Autores.

Cuando se cargue la ventana principal, el programa estará listo para ser ejecutado.

A.3 LA INTERFAZ

Por medio de una serie de menús, el programa permite al usuario calibrar y controlar todo el sistema. Entre las diferentes opciones (que se explicarán más adelante) se destacan:

- * Configuración del sensor estelar.
- * Video en tiempo real del campo de visión del sensor estelar.
- * Captura de imágenes y video.
- * Almacenamiento en disco de las imágenes y videos capturados.
- * Creación y configuración de catálogos estelares.
- * Creación de cartas celestes a partir del catálogo elegido.
- * Reducción astrométrica de imágenes.
- * Configuración puerto RS232 para control dinámico.
- * Mando de control de los movimientos del telescopio.
- * Modo GoTo sobre la imagen.
- * Modo de visión nocturna.
- * Manual de ayuda en PDF.
- * Servicio de asistencia en línea para actualizaciones y novedades.
- * Fecha y hora actual.

La interfaz de OEIL, está dividida en cinco partes principales: barra de menú, control de identificación, seguimiento y video, zona de visualización, control del telescopio y reloj. Estas zonas se pueden observar en la figura 67 y serán descritas a continuación:

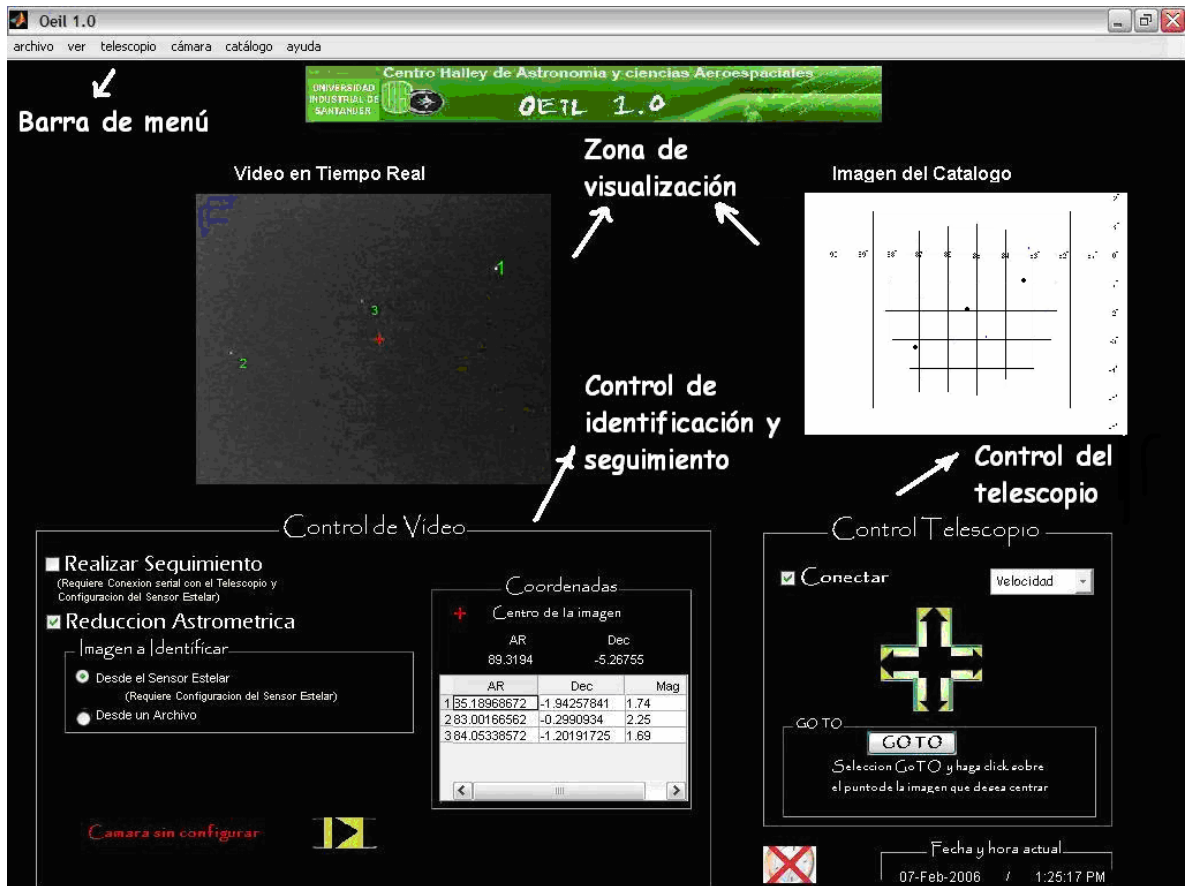


Figura 67 Esquema general de OEIL

Fuente: Autores.

A.3.1 BARRA DE MENÚS

A.3.1.1 Menú Archivo

Este menú presenta las opciones de guardar resultados de visualización y de salida del programa como se muestra en la figura 68.

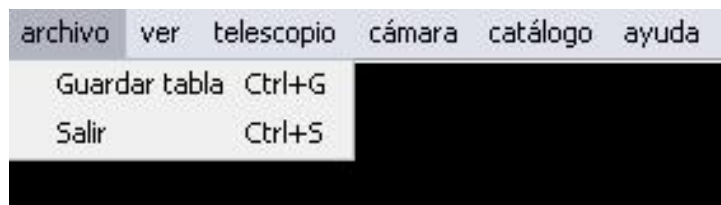


Figura 68 Menú archivo

Fuente: Autores.

La opción guardar tabla, como su nombre lo indica, guarda la tabla de resultados provenientes de la reducción astrométrica. Estos resultados son almacenados con la extensión *.txt, dentro de la carpeta de trabajo en la cual se está ejecutando el programa.

Esta opción solo está disponible cuando se han obtenido resultados provenientes de la identificación. Una vez escogida esta opción, se abre la ventana mostrada en la figura 69.



Figura 69 Menú guardar resultados

Fuente: Autores.

Para guardar el resultado, solo es necesario ingresar un nombre al archivo a guardar, si el archivo ya existe o el nombre no es válido, el programa enviará la respectiva advertencia.

A.3.1.2 Menú Ver

Como se aprecia en la figura 70, este menú contiene el acceso a la herramienta de visión nocturna llamada DarkAdapted ©⁴⁴. Esta opción es de gran utilidad en caso de encontrarse en entornos oscuros, situación típica en observaciones astronómicas, ya que permite configurar la gama de colores del monitor, brindando una mayor comodidad al usuario.

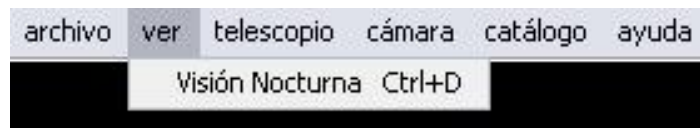


Figura 70 Menú Visión nocturna

Fuente: Autores.

En la figura 71 se puede apreciar la visualización esta aplicación.



Figura 71 Aplicación DarkAdapted ©

Fuente: Autores.

⁴⁴ DarkAdapted © es una herramienta de libre distribución y está disponible en <http://www.adpartnership.net/DarkAdapted/>.

A.3.1.3 Menú Telescopio

Este menú permite la comunicación serial entre el computador y el telescopio, para enviar comandos de movimiento. Contiene las opciones de control de sentido de movimiento (norte, sur, este y oeste), velocidad (tres velocidades y la opción de parar), seguimiento y modo goto, como se ilustra en la figura 72



Figura 72 Menú Telescopio

Fuente: Autores.

A.3.1.4 Menú Cámara

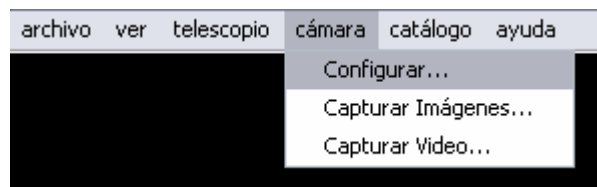


Figura 73 Menú cámara

Fuente: Autores.

Como se aprecia en la figura 73, al desplegar el menú cámara, aparecen 3 posibles opciones, la primera de ellas es configurar, la cual permite acceder a la ventana de configuración del sensor estelar, tan pronto se configura el sensor, es posible acceder a las otras 2 opciones del menú, las cuales son capturar imágenes y capturar video.

A.3.1.5 Configurar

Al acceder, esta ventana presenta el aspecto mostrado en la figura 74.

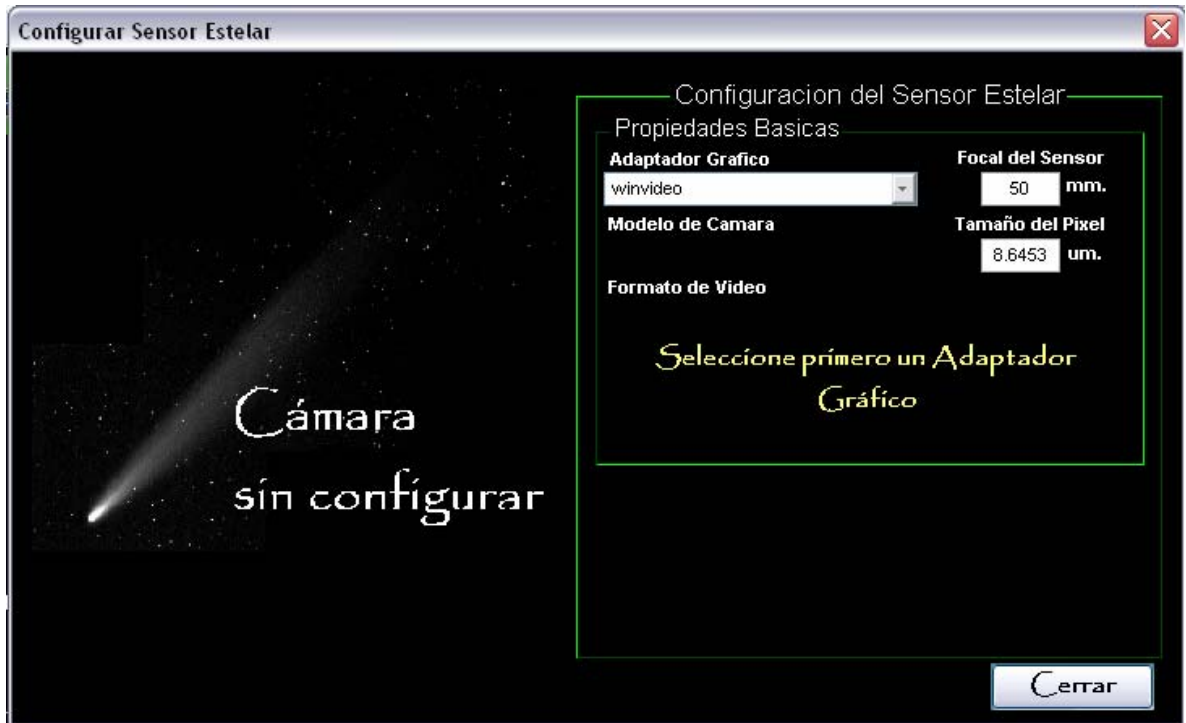


Figura 74 Configuración del sensor

Fuente: Autores.

En esta área hay 4 regiones principales, la primera es la de propiedades básicas, donde el usuario puede configurar cualquier sensor estelar conectado al computador. El programa está ideado para que una persona, paso a paso, configure el sensor sin contratiempos.

Dentro de las opciones básicas, se encuentran los popup menús de adaptador gráfico, modelo de la cámara, tamaño del píxel, distancia focal y el formato de video.

Como se aprecia en la figura 75. El programa detecta automáticamente los dispositivos de captura de imágenes conectados al equipo y despliega esta información para que el usuario pueda escoger el sensor adecuado.

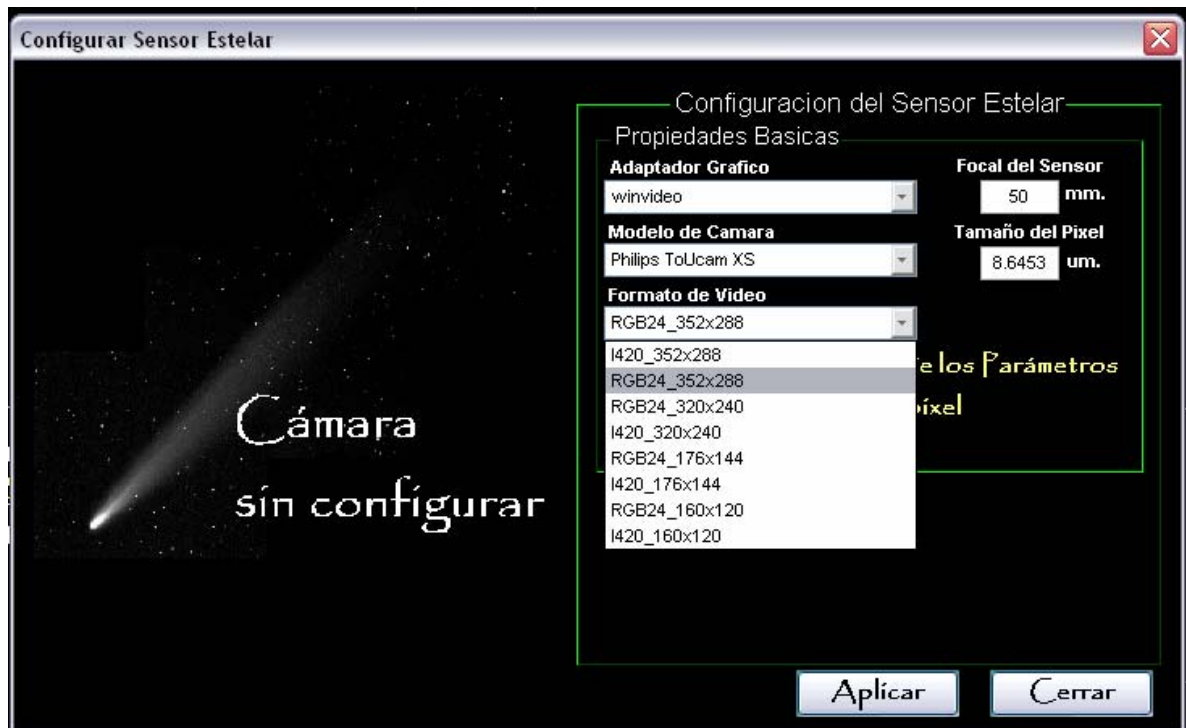


Figura 75 Selección de propiedades en la configuración del sensor

Fuente: Autores.

Una vez se han seleccionado las diferentes propiedades del sensor con el que se va a trabajar, se puede acceder a la segunda región, la cual contiene los botones de aceptar, aplicar y cerrar.

El botón "aplicar" permite adjudicar las condiciones establecidas para la configuración del sensor. Pulsando sobre el botón "cerrar", se interrumpe el proceso y se cierra la ventana. Cuando se pulsa el botón de "aceptar", se aplican los cambios y se cierra la ventana.

La tercera región de interés, contiene los parámetros avanzados del sensor, como la región de la superficie del sensor a trabajar y el tipo de entrada (para sensores de varios canales). En la figura 76 se aprecia un ejemplo de este tipo de configuración.



Figura 76 Configuración de parámetros avanzados del sensor.

Fuente: Autores.

Nótese que una vez está configurada la cámara, la imagen de fondo que indicaba la ausencia de la cámara es reemplazada por otra imagen, donde se advierte que la cámara ya ha sido configurada. Bajo este aviso, se encuentra una casilla que al activarse permite ver video en tiempo real, para detener la visualización, simplemente se desactiva la casilla. Si el usuario desea salir, puede pulsar el botón cerrar o el botón en la esquina superior derecha de la ventana.

A.3.1.6 Guardar video

Cuando el sensor está listo, es posible realizar cortas capturas de video, para esto, se puede acceder al menú y seleccionar la casilla guardar video, la cual activa la ventana que se muestra en la figura 77.



Figura 77 Adquisición de video

Fuente: Autores.

Esta ventana posee un visualizador de todos los archivos de video *.AVI que se encuentren dentro de la carpeta del path actual del programa. El usuario puede escribir un nombre y duración en segundos del video, los cuales son sometidos a los controles de sobrescribir nombre y nombre inválido. Además el usuario puede visualizar video en tiempo real.

Tan pronto se pulse el botón guardar, se comenzará con la adquisición de video, hasta que se cumpla el tiempo o hasta que el algoritmo de control de memoria se active.

A.3.1.7 Guardar imagen

Al igual que el anterior, en el menú de cámara existe una opción que permite adquirir imágenes y guardarlas en disco, con formato JPG o BMP. Esta ventana posee los mismos controles de validación de nombre del archivo. En una ventana se visualiza la imagen a guardar.

Las capturas son realizadas desde el momento en que se hace el llamado a dicha rutina. En la figura 78 se aprecia una imagen de esta ventana.

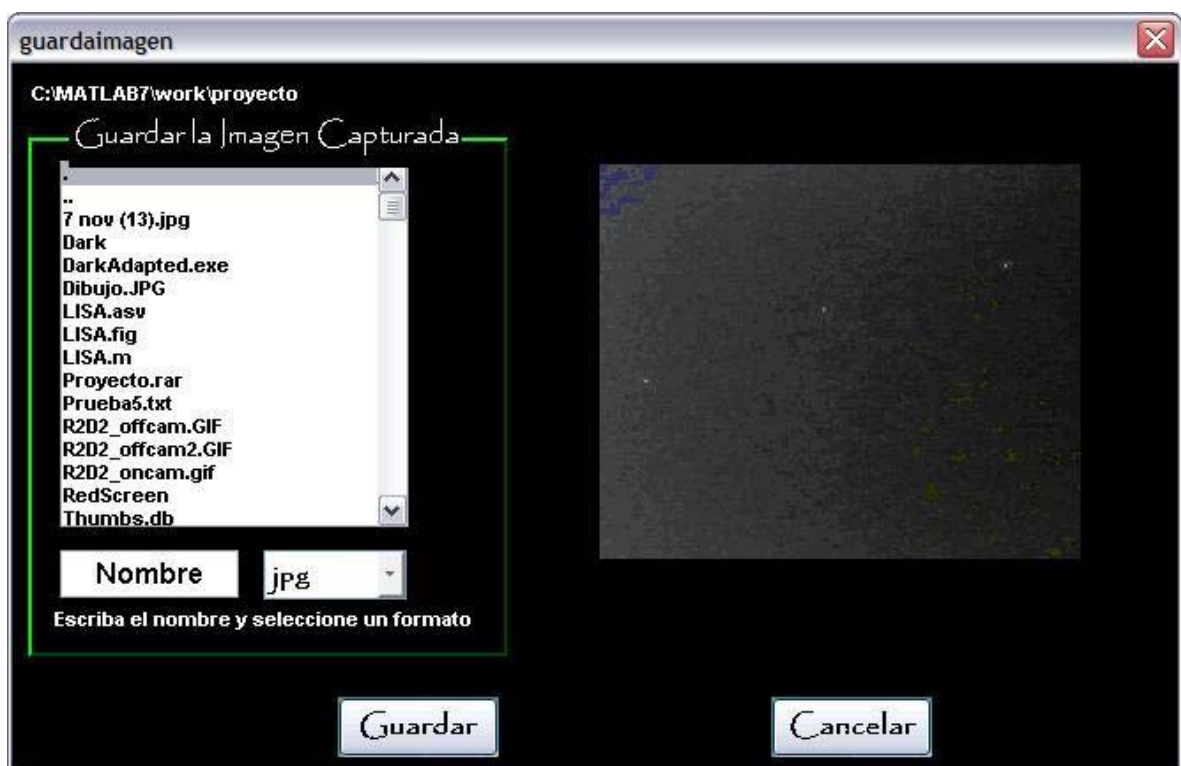


Figura 78 Guardar imagen.

Fuente: Autores.

A.3.1.8 Menú catálogo

Como se explicó en la sección de los algoritmos, El menú catálogo, permite configurar el catálogo a utilizar en el proceso de identificación, ya sea creando uno a partir de parámetros específicos o cargando uno previamente creado. Los catálogos creados son almacenados en disco.

Además, este menú permite la creación de una carta celeste a partir de los parámetros introducidos por el usuario.

Este menú se puede observar en la figura 79.

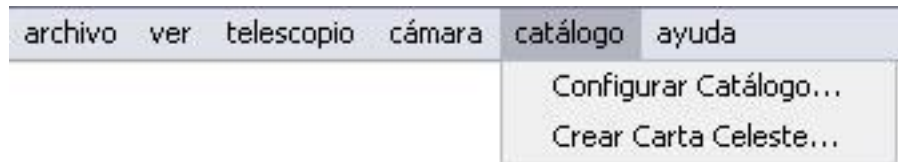


Figura 79 Menú catálogo

Fuente: Autores.

Cuando se selecciona la opción Configurar Catálogo aparece la ventana mostrada en la figura 80. El usuario simplemente debe hacer doble clic sobre el nombre del catálogo a utilizar.

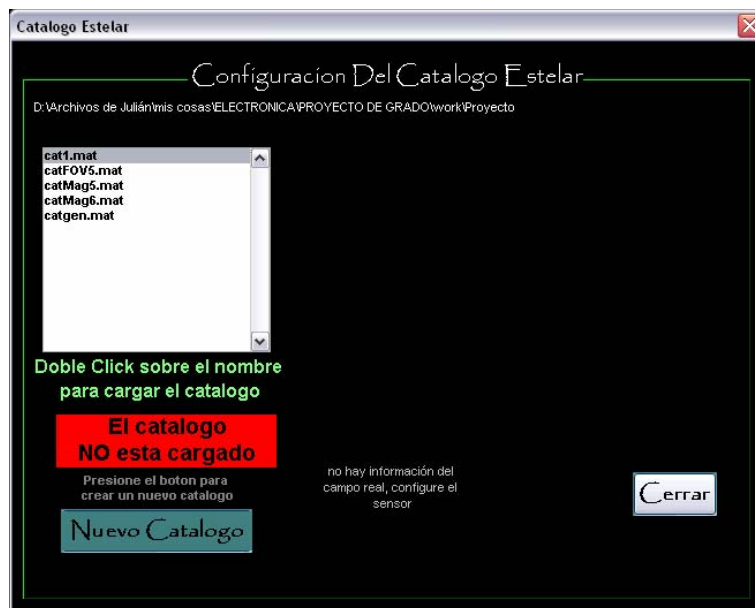


Figura 80 Configuración del catálogo estelar.

Fuente: Autores.

Si el usuario desea crear un nuevo catálogo, se debe presionar el botón “nuevo catálogo”, el cual activa la zona de indexado mostrada en la figura 81, en donde se escogerán los parámetros para la creación del catálogo, los cuales son el campo de visión requerido (FOV) con valor mínimo de 0° y máximo de 180° , la magnitud visual mínima de las estrellas a indexar, con valor máximo de -1.44 y mínimo de 6 (recordar la interpretación de estos valores).

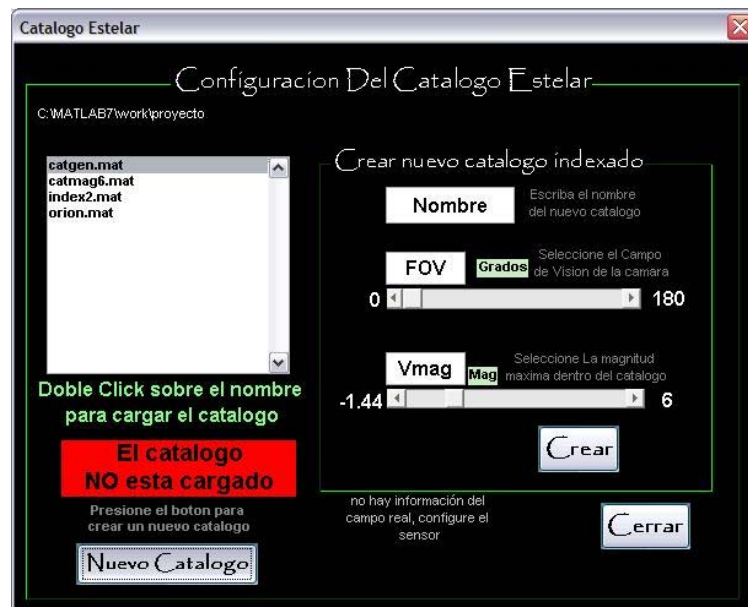


Figura 81 Configuración catálogo estelar

Fuente: Autores.

Una vez especificados los valores del catálogo, se presiona “crear”, con lo que se comienza el indexado del catálogo y se activa una barra que indica el estado del proceso, tal como se ilustra en la figura 82.

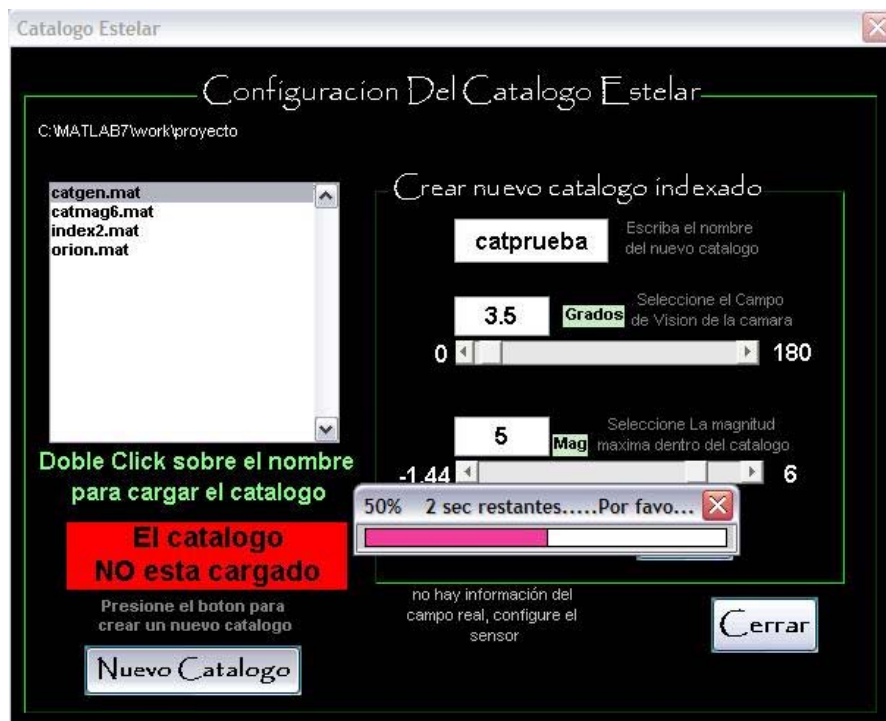


Figura 82 Indexado del catálogo

Fuente: Autores.

Al igual que en los procesos anteriores que incluyen la creación de nuevas variables o archivos, la creación del catálogo está sujeta a los controles de nombre y validez ya mencionados.

El proceso de indexado del catálogo principal ha sido altamente optimizado gracias al manejo matricial de Matlab 7.0®; por ejemplo, para un campo de visión de 5° y magnitud visual mínima de 6V. Como resultado se obtiene una matriz de 25'426804 celdas, la cual contiene información astrométrica que requiere de una serie de operaciones matemáticas por cada celda.

Inicialmente la ejecución de este proceso tardaba aproximadamente 7 horas y generaba un archivo cuyo tamaño era cercano a los 600 Mb; en la versión final, el mismo proceso, con igual información, se realiza en aproximadamente 10 segundos y genera un archivo cuyo tamaño oscila los 300 Kb, el diagrama de flujo

del algoritmo implementado es el mismo, solo que la programación aprovechó las bondades de Matlab 7.0® en el manejo matricial.

A.3.1.9 Menú Ayuda

Este menú contiene cuatro opciones, las cuales son:

- Temas de ayuda: abre el manual para el usuario de OEIL 1.0
- Ayuda on line: Esta opción comunica con la página oficial del proyecto, la cual reside dentro del servidor del Centro Halley de Astronomía y ciencias Aeroespaciales, brindando la posibilidad de aclarar inquietudes y expresar opiniones, relacionadas con el proyecto y la astronomía.
- Universidad Industrial de Santander: Comunica con la página de la UIS.
- Acerca de OEIL: Muestra información básica del Software OEIL 1.0

Este menú se puede observar en la figura 83

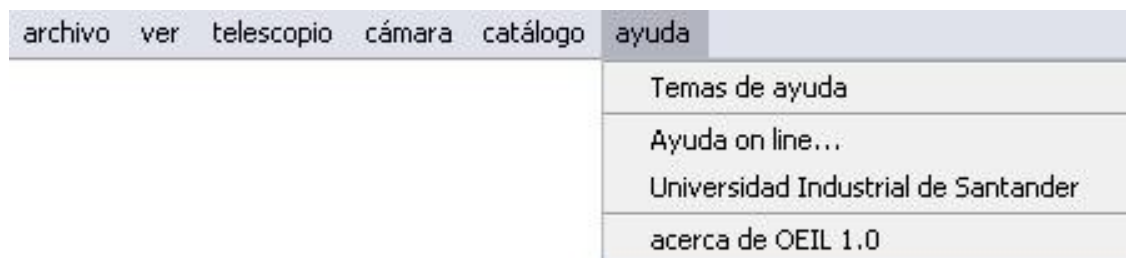


Figura 83 Menú ayuda

Fuente: Autores.

Junto con la completa ayuda brindada, el programa ha sido diseñado para que el usuario encuentre comentarios y diálogos emergentes, los cuales le brindarán información del estado del proceso que este realizando y una corta explicación de las principales funciones de la interfaz. Un ejemplo de esto se puede ver en la figura 84



Figura 84 Ayudas emergentes

Fuente: Autores.

A.3.2 CONTROL DE IDENTIFICACIÓN , SEGUIMIENTO Y VIDEO

En esta zona de la interfaz, se encuentra uno de los principales controles del software. Este control se presenta en la figura 85

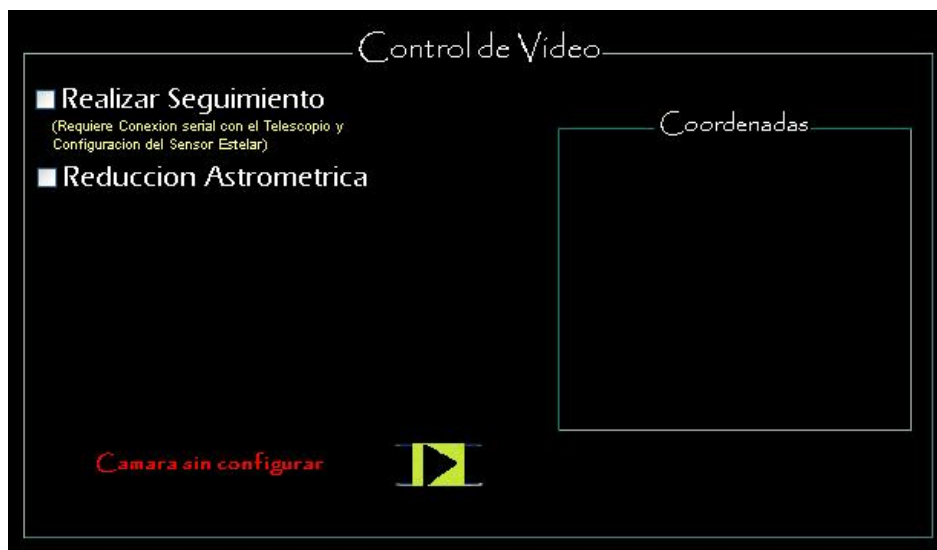



Figura 85 Control de identificación y seguimiento

Fuente: Autores.

La primera casilla activa la opción del seguimiento, debe estar configurado el sensor estelar.

Debajo de la casilla de seguimiento se encuentra la casilla de reducción astrométrica, la cual permite seleccionar el tipo de reducción astrométrica a realizar, esta puede ser desde el sensor estelar o desde una imagen de archivo. Al lado derecho se encuentra la zona de visualización de resultados.

Después de escoger los parámetros, los procesos de esta zona son activados por medio de la pulsación del botón , ubicado en la parte inferior de la misma.

Si el usuario no activo ninguna casilla se inicializa la visualización de video en tiempo real (el sensor debe estar configurado).

A.3.2.1 Realizar seguimiento

Como su nombre lo indica, esta opción activa el seguimiento de una estrella, para lo cual se requiere de la configuración del sensor estelar y de la conexión, vía puerto serial, al telescopio.

La función de esta opción es mantener centrada la imagen actual del sensor sin perderla del campo de visión, contrarrestando los movimientos propios de las estrellas.

A.3.2.2 Reducción astrométrica

La interfaz permite la escogencia de la reducción astrométrica, ya sea desde el sensor estelar o desde una imagen de archivo, de la cual se debe tener pleno conocimiento de su campo horizontal, expresado en grados.

La reducción astrométrica requiere que algún catálogo haya sido cargado, además si se realiza la reducción desde el sensor estelar, se requiere de su configuración. Esta zona de la interfaz se muestra en la figura 86.



Figura 86 Reducción astrométrica

Fuente: Autores.

Si la identificación va a realizarse desde un archivo, se tiene la posibilidad de incluir imágenes de *dark current* y *flat*. Una vez activada este tipo de reducción, se visualiza una ventana de abrir imagen como se muestra en la figura 87.

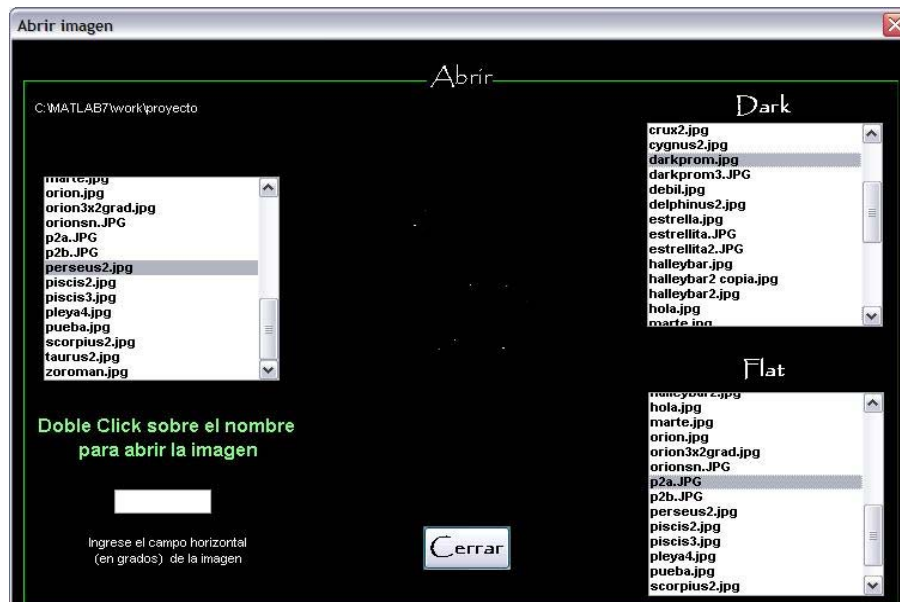


Figura 87 Abrir imagen

Fuente: Autores.

Es necesario que la imagen que se desea procesar se encuentre en la carpeta de trabajo actual. Una vez copiada en esta carpeta, estará disponible en la lista que aparece en la ventana. Para hacer una selección, se debe hacer doble click sobre el nombre de la imagen deseada, esta se visualizará en la parte central de la ventana y posteriormente en la zona de visualización de la ventana principal de OEIL. En la zona inferior izquierda se ingresa el dato del campo. Para la escogencia del *dark current* y *flat*, se escogen igualmente a manera de doble click, en las listas respectivas.

A.3.2.3 Video en tiempo real

La visualización se lleva a cabo cuando no es activada ninguna de las opciones de reducción astrométrica ni seguimiento. Esto activa el sensor estelar y las imágenes provenientes de este son mostradas en la *zona de visualización*. Para activar esta opción, es necesaria la previa configuración del sensor estelar.

A.3.2.4 Zona de resultados

Esta sección se encuentra ubicada en la parte derecha del control de identificación, seguimiento y video, en el cuadro llamado “coordenadas”. En ella se presentan las coordenadas del centro de la imagen y una tabla con los resultados provenientes de la identificación, los cuales pueden ser guardados como ya se comentó.

Como se puede observar en la figura 88, la tabla de resultados contiene 4 columnas las cuales son el número de identificación (ID), la ascensión recta, la declinación y magnitud. Las filas representan cada una de las estrellas identificadas por los números de la primera columna (ID), estos números también son ubicados sobre las correspondientes estrellas de la imagen, con el fin de facilitar al usuario la interpretación de los resultados.

Coordenadas

+ Centro de la imagen

AR Dec

52.0055 48.8806

	AR	Dec	M
1	52.64367585	47.99517199	4.36
2	52.65388405	48.10365477	5.82
3	53.03575392	48.02353391	5.47
4	50.46821583	49.07105892	5.94
5	50.80490169	49.2133301	5.32

Figura 88 Resultados

Fuente: Autores.

A.3.3 CONTROL DEL TELESCOPIO

La función de esta sección es la activación de la conexión serial con el telescopio, así como el manejo del mismo por medio de un panel a modo de *joystick*.

También es posible el control de tres velocidades, las cuales son:

- 0.004 °/seg.
- 0.27 °/seg.
- 6.5 °/seg.

La opción de goto centra un punto deseado en la imagen, por medio del movimiento del telescopio. Esta opción solo se encuentra disponible con la configuración inicial de la cámara. Este control se puede apreciar en la figura 89.

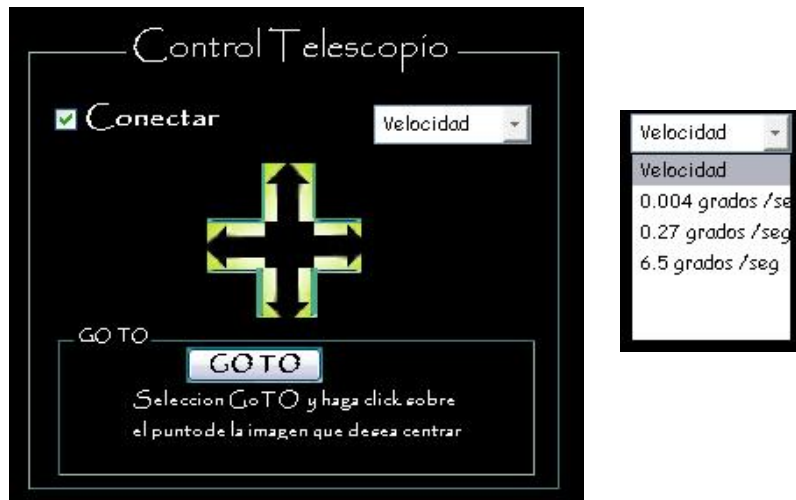


Figura 89 Control del telescopio.

Fuente: Autores.

A.3.4 EL RELOJ

El reloj visualiza la fecha y hora actual. Esta información es útil en caso de registro de datos de observación, debido a que consume recursos del sistema, su estado normal es inactivo. Para visualizar la fecha y hora basta con activar el botón del reloj, (Ver figura 90), el cual encuentra en la parte inferior izquierda de la ventana principal de oeil.




Figura 90 Reloj

Fuente: Autores.

Se debe tener presente que esta opción interrumpe procesos del sistema, como las capturas de imágenes y video, reducción astrométrica y seguimiento.

A.4 REALIZANDO UNA IDENTIFICACIÓN

La reducción astrométrica requiere la configuración inicial del catálogo y del sensor estelar (en caso de una identificación desde el sensor). Esta configuración se lleva a cabo como se indica en la sección de catálogo y configuración de la cámara. Si estas configuraciones no se han realizado inicialmente, en el momento de activar el botón , automáticamente serán ejecutadas las rutinas necesarias.

La identificación requiere que en la imagen se encuentren por lo menos 3 estrellas, de lo contrario, es visualizado el mensaje de error mostrado en la figura 91.



Figura 91 Mensaje de error

Fuente: Autores.

Si el número de estrellas es mayor que 3, pero el campo especificado en la imagen es erróneo o si se encuentra más de un posible resultado, el mensaje visualizado en la figura 92 es desplegado bajo la zona de resultados.

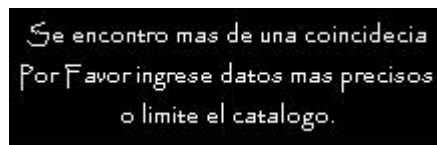


Figura 92 Mensaje Advertencia

Fuente: Autores.

Si el campo ingresado es correcto, pero se sigue llegando a un fallo, se recomienda limitar el catálogo, utilizando uno cuyo campo de indexado sea el más

cercano (por encima) al valor del campo horizontal de la imagen y que además contenga las estrellas acordes a las magnitudes registradas en la imagen. Esto incrementará las posibilidades de acierto y acortará el proceso de identificación.

Por otro lado, una reducción exitosa desplegará los resultados en la pantalla tal como se aprecia en la figura 93, donde se puede ver las estrellas numeradas con los identificadores que aparecen en la zona de resultados. Nótese que no se observan mensajes de advertencia en la ventana principal de OEIL 1.0.

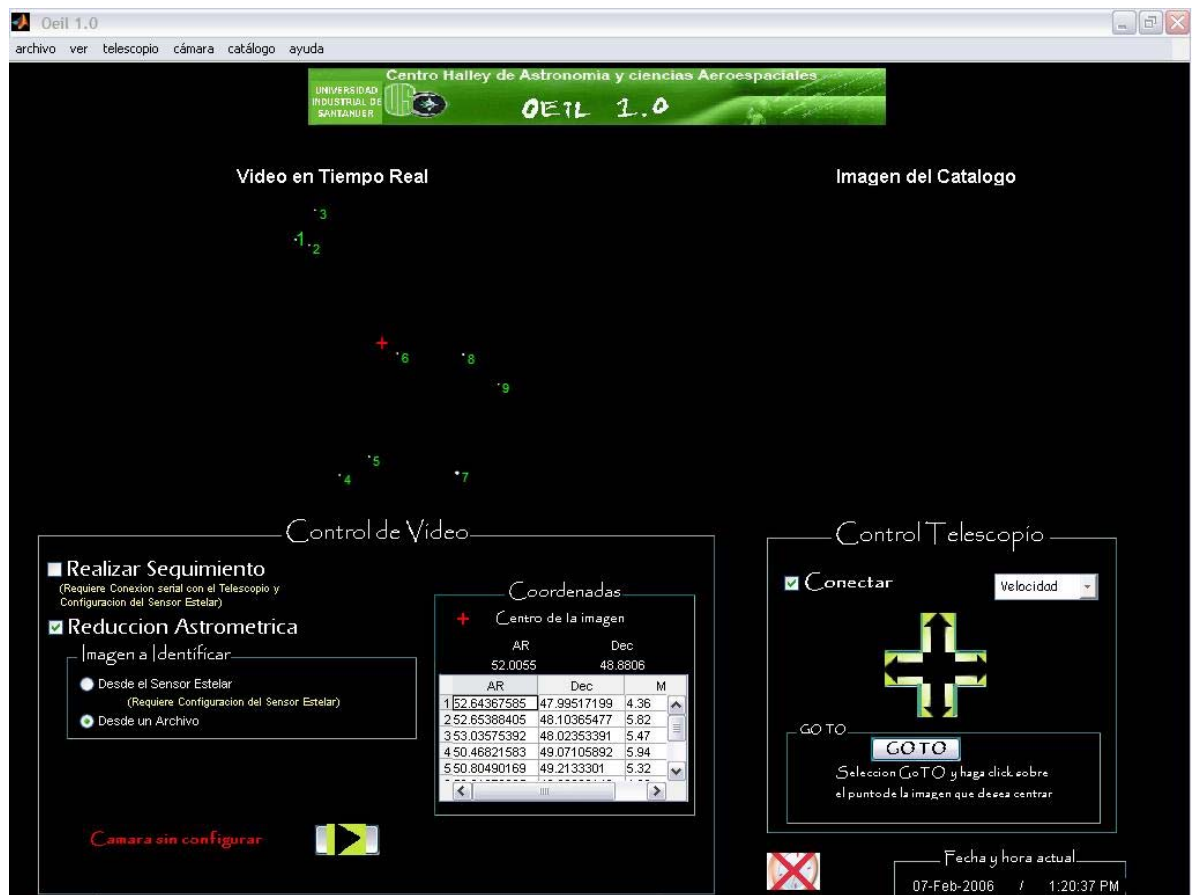



Figura 93 El programa OEIL funcionando.

Fuente: Autores.

A.5 REALIZANDO SEGUIMIENTO

Este proceso requiere la configuración inicial de la cámara, si este proceso no se realiza previamente, al momento de ser activado, ya sea por medio del botón  o por el menú telescopio, se desplegará la ventana de configuración de la cámara, descrita en la sección de menú Cámara (esto se realiza para cualquier otro proceso que requiera el uso del sensor).

Si las condiciones no permiten continuar con la observación de la estrella, un mensaje de alerta de “seguimiento no disponible” será visualizado en pantalla.

A.6 ACERCA DE LA ADQUISICIÓN DEL VIDEO

Para finalizar, se recomienda realizar los procesos de captura de *dark current* y *flat*, los cuales permitirán un mejor tratamiento de las imágenes, minimizando las posibilidades de error.

ANEXO B SET DE INSTRUCCIONES DEL TELESCOPIO MEADE LX-90; LX200

Fuente: <http://www.meade.com/support/>

Meade Telescope Serial Command Protocol

Introduction

This paper documents the Meade Telescope Serial Control Protocol utilized to remotely command and control Meade Telescopes. This command language contains a core of common commands supported by all telescope. Due to different implementation and technological advances the command has extension that are not supported by all model. The differences are noted in the descriptive text for the commands. Finally, there are a series of new commands proposed for the LX200GPS. These commands are indicated in the Appendix A at the end of this document. As an extension to the Telescope Protocol beginning with the LX200GPS, a possible response to any command is ASCII NAK (0x15). Should the telescope control chain be busy and unable to accept an process the command, a NAK will be sent within 10 msec of the receipt of the '#' terminating the command. In this event, the controller should wait a reasonable interval and retry the command.

Telescope Command Groupings:	Command Designator	----- Supported -----				
		Symbol	AutoStar	LX200<16"	LX 16"	LX200GPS
Command Group						
Alignment Query	<ACK>		x	x	x	x
Alignment*	A		x	x	x	x
Active Backlash	\$B		-	-	-	x
Reticule Control*	B		x	p	p	x
Sync Control	C		p	p	p	x
Distance Bars	D		x	x	x	x
Fan*	f		-	-	p	x
Focus Control Commands	F		p	p	p	x
GPS Commands	g		-	-	-	x
Get Information	G		x	x	x	x
Home Position Commands*	h		x	-	x	x
Hour	H		x	x	x	x
Initialize Telescope	I		-	-	-	x
Library	L		p	p	p	x
Movement	M		x	p	x	x
High Precision	P		x	x	x	x
Smart Drive Control*	\$Q		x	x	x	x
Quit Command	Q		x	x	x	x
Field De-rotator	r		-	-	p	x
Rate Control	R		p	p	p	x
Set Information	S		x	x	x	x
Tracking Frequency	T		p	p	p	x
User Format Control	U		p	x	x	x
Way point (Site)	W		x	x	x	x
Help Commands	?		-	x	x	-

Notes:

Commands accepted by the telescopes are shown in the table above indicated by an x entry. This means that the telescope will accept these commands and respond with a syntactically valid response where required. A "p" indicated only a subset of this command class is supported. Due to the differing implementations of the telescopes, some of the commands may provide static responses or may do nothing in response to the command. See the detailed description of the commands below to determine the exact behavior.

ACK - Alignment Query

ACK <0x06> Query of alignment mounting mode.

Returns:

A If scope in AltAz Mode

L If scope in Land Mode

P If scope in Polar Mode

Meade Telescope Protocol

-

A - Alignment Commands

:Aa# Start Telescope Automatic Alignment Sequence [LX200GPS only]

Returns:

1: When complete (can take several minutes).

0: If scope not AzEl Mounted or align fails

:AL# Sets telescope to Land alignment mode

Returns: nothing

:AP# Sets telescope to Polar alignment mode

Returns: nothing

:AA# Sets telescope the AltAz alignment mode

Returns: nothing

\$B – Active Backlash Compensation

:\$BAdd#

Set Altitude/Dec Antibacklash

Returns Nothing

:\$BZdd#

Set Azimuth/RA Antibacklash

Returns Nothing

B - Reticule/Accessory Control

:B+# Increase reticule Brightness

Return: Nothing

:B-# Decrease Reticule Brightness

Return: Nothing

:B<n># Set Reticule flash rate to <n> (an ASCII expressed number)

<n> Values of 0..3 for LX200 series

<n> Values of 0..9 for Autostar and LX200GPS

Return: Nothing

:BDn# Set Reticule Duty flash duty cycle to <n> (an ASCII expressed digit) [LX200 GPS Only]

<n> Values: 0 = On, 1..15 flash rate

Return: Nothing

C - Sync Control

:CL# Synchronize the telescope with the current Selenographic coordinates.

:CM# Synchronizes the telescope's position with the currently selected database object's coordinates.

Returns:

LX200's - a "#" terminated string with the name of the object that was synced.

Autostars & LX200GPS - At static string: " M31 EX GAL MAG 3.5 SZ178.0#"

D - Distnace Bars

:D# Requests a string of bars indicating the distance to the current library object.

Returns:

LX200's – a string of bar characters indicating the distance.

Autostars and LX200GPS – a string containing one bar until a slew is complete, then a null string is returned.

Meade Telescope Protocol**f - Fan Command**

:f+# LX 16?– Turn on the tube exhaust fan

LX200GPS – Turn on power to accessor panel
Autostar & LX200 < 16” – Not Supported
Returns: nothing
:f-# LX 16” – Turn off tube exhaust fan
LX200GPS - Turn off power to accessory panel
Autostar & LX200 < 16” – Not Supported
Returns: Nothing
:ft# LX200GPS – Return Optical Tube Assembly Temperature
Returns <sdd.ddd># - a ‘#’ terminated signed ASCII real number indicating the Celsius ambient temperature.
All others – Not supported

F – Focuser Control

:F+# Start Focuser moving inward (toward objective)
Returns: None
:F-# Start Focuser moving outward (away from objective)
Returns: None
:FQ# Halt Focuser Motion
Returns: Nothrning
:FF# Set Focus speed to fastest setting
Returns: Nothing
:FS# Set Focus speed to slowest setting
Returns: Nothing
:F<n># Autostar & LX200GPS – set focuser speed to <n> where <n> is an ASCII digit 1..4
Returns: Nothing
LX200 – Not Supported

g – GPS/Magnetometer commands

:g+# LX200GPS Only - Turn on GPS
Returns: Nothing
:g-# LX200GPS Only - Turn off GPS
:gps# LX200GPS Only – Turns on NMEA GPS data stream.
Returns: The next string from the GPS in standard NEMA format followed by a ‘#’ key
:gT# Powers up the GPS and updates the system time from the GPS stream. The process my take several minutes to complete.
During GPS update, normal handbox operations are interrupted. [LX200gps only]
Returns: ‘0’ In the event that the user interrupts the process, or the GPS times out.
Returns: ‘1’ After successful updates

G – Get Telescope Information

:G0# Get Alignment Menu Entry 0
Returns: A ‘#’ Terminated ASCII string. [LX200 legacy command]
:G1# Get Alignment Menu Entry 0
Returns: A ‘#’ Terminated ASCII string. [LX200 legacy command]

Meade Telescope Protocol

-
:G2# Get Alignment Menu Entry 0
Returns: A ‘#’ Terminated ASCII string. [LX200 legacy command]
:GA# Get Telescope Altitude
Returns: sDD*MM# or sDD*MM’Ss#
The current scope altitude. The returned format depending on the current precision setting.
:Ga# Get Local Telescope Time In 12 Hour Format
Returns: HH:MM:SS#
The time in 12 format
:Gb# Get Browse Brighter Magnitude Limit
Returns: sMM.M#
The magnitude of the faintest object to be returned from the telescope FIND/BROWSE command.
Command when searching for objects in the Deep Sky database.

:GC# Get current date.
Returns: MM/DD/YY#
The current local calendar date for the telescope.

:Gc# Get Calendar Format
Returns: 12# or 24#
Depending on the current telescope format setting.

:GD# Get Telescope Declination.
Returns: sDD*MM# or sDD*MM'SS#
Depending upon the current precision setting for the telescope.

:Gd# Get Currently Selected Object/Target Declination
Returns: sDD*MM# or sDD*MM'SS#
Depending upon the current precision setting for the telescope.

:GF# Get Find Field Diameter
Returns: NNN#
An ASCII interger expressing the diameter of the field search used in the IDENTIFY/FIND commands.

:Gf# Get Browse Faint Magnitude Limit
Returns: sMM.M#
The magnitude or the birghtest object to be returned from the telescope FIND/BROWSE command.

:GG# Get UTC offset time
Returns: sHH# or sHH.H#
The number of decimal hours to add to local time to convert it to UTC. If the number is a whole number the sHH# form is returned, otherwise the longer form is return. On Autostar and LX200GPS, the daylight savings setting in effect is factored into returned value.

:Gg# Get Current Site Longitude
Returns: sDDD*MM#
The current site Longitude. East Longitudes are expressed as negative

:Gh# Get High Limit
Returns: sDD*
The minimum elevation of an object above the horizon to which the telescope will slew with reporting a "Below Horizon" error.

:GL# Get Local Time in 24 hour format
Returns: HH:MM:SS#

Meade Telescope Protocol

The Local Time in 24-hour Format

:Gl# Get Larger Size Limit
Returns: NNN'#
The size of the smallest object to be returned by a search of the telescope using the BROWSE/FIND commands.

:GM# Get Site 1 Name
Returns: <string>#
A '#' terminated string with the name of the requested site.

:GN# Get Site 2 Name
Returns: <string>#
A '#' terminated string with the name of the requested site.

:GO# Get Site 3 Name
Returns: <string>#
A '#' terminated string with the name of the requested site.

:GP# Get Site 4 Name
Returns: <string>#
A '#' terminated string with the name of the requested site.

:Go# Get Lower Limit
Returns: DD*#

The highest elevation above the horizon that the telescope will be allowed to slew to without a warning message.

:Gq# Get Minimum Quality For Find Operation

Returns:

SU# Super

EX# Excellent

VG# Very Good

GD# Good

FR# Fair

PR# Poor

VP# Very Poor

The minimum quality of object returned by the FIND command.

:GR# Get Telescope RA

Returns: HH:MM.T# or HH:MM:SS#

Depending which precision is set for the telescope

:Gr# Get current/target object RA

Returns: HH:MM.T# or HH:MM:SS

Depending upon which precision is set for the telescope

:GS# Get the Sidereal Time

Returns: HH:MM:SS#

The Sidereal Time as an ASCII Sexidecimal value in 24 hour format

:Gs# Get Smaller Size Limit

Returns: NNN#

The size of the largest object returned by the FIND command expressed in arcminutes.

:GT# Get tracking rate

Returns: TT.T#

Current Track Frequency expressed in hertz assuming a synchronous motor design where a 60.0 Hz motor clock

would produce 1 revolution of the telescope in 24 hours.

Meade Telescope Protocol

:Gt# Get Current Site Latitude

Returns: sDD*MM#

The latitude of the current site. Positive implies North latitude.

:GVD# Get Telescope Firmware Date

Returns: mmm dd yyyy#

:GVN# Get Telescope Firmware Number

Returns: dd.d#

:GVP# Get Telescope Product Name

Returns: <string>#

:GVT# Get Telescope Firmware Time

returns: HH:MM:SS#

:Gy# Get deepsky object search string

Returns: GPDCO#

A string indicating the class of objects that should be returned by the FIND/BROWSE command. If the character

is upper case, the object class is return. If the character is lowercase, objects of this class are ignored. The character meanings are as follows:

G – Galaxies

P – Planetary Nebulas

D – Diffuse Nebulas

C – Globular Clusters

O – Open Clusters

:GZ# Get telescope azimuth

Returns: DDD*MM#T or DDD*MM'SS#

The current telescope Azimuth depending on the selected precision.

h – Home Position Commands

:hS# LX200GPS and LX 16” Seeks Home Position and stores the encoder values from the aligned telescope at the home position in the nonvolatile memory of the scope.

Returns: Nothing

Autostar,LX200 – Ignored

:hF# LX200GPS and LX 16” Seeks the Home Position of the scope and sets/aligns the scope based on the encoder values stored in non-volatile memory

Returns: Nothing

Autostar,LX200 - Ignored

:hN# LX200GPS only: Sleep Telescope. Power off motors, encoders, displays and lights. Scope remains in minimum power mode until a keystroke is received or a wake command is sent.

:hP# Autostar, LX200GPS and LX 16”Slew to Park Position

Returns: Nothing

:hW# LX200 GPS Only: Wake up sleeping telescope.

:h?# Autostar, LX200GPS and LX 16” Query Home Status

Returns:

0 Home Search Failed

1 Home Search Found

2 Home Search in Progress

Meade Telescope Protocol

LX200 Not Supported

H – Time Format Command

:H# Toggle Between 24 and 12 hour time format

Returns: Nothing

I – Initialize Telescope Command

:I# LX200 GPS Only - Causes the telescope to cease current operations and restart at its power on initialization.

L – Object Library Commands

:LB# Find previous object and set it as the current target object.

Returns: Nothing

LX200GPS & Autostar – Performs no function

:LCNNNN#

Set current target object to deep sky catalog object number NNNN

Returns : Nothing

LX200GPS & Autostar – Implemented in later firmware revisions

:LF# Find Object using the current Size, Type, Upper limit, lower limit and Quality constraints and set it as current target object.

Returns: Nothing

LX200GPS & Autostar – Performs no function

:Lf# Identify object in current field.

Returns: <string>#

Where the string contains the number of objects in field & object in center field.

LX200GPS & Autostar – Performs no function. Returns static string “0 - Objects found”.

:LI# Get Object Information

Returns: <string>#

Returns a string containing the current target object’s name and object type.

LX200GPS & Autostar – performs no operation. Returns static description of Andromeda Galaxy.

:LMNNNN#

Set current target object to Messier Object NNNN, an ASCII expressed decimal number.

Returns: Nothing.

LX200GPS and Autostar – Implemented in later versions.

:LN# Find next deep sky target object subject to the current constraints.

LX200GPS & AutoStar – Performs no function

:LoD# Select deep sky Library where D specifies

0 - Objects CNGC / NGC in Autostar & LX200GPS

1 - Objects IC

2 – UGC

3 – Caldwell (Autostar & LX200GPS)

4 – Arp (LX200 GPS)

5 – Abell (LX200 GPS)

Returns:

1 Catalog available

0 Catalog Not found

LX200GPS & AutoStar – Performs no function always returns “1”

:LsD# Select star catalog D, an ASCII integer where D specifies:

0 STAR library (Not supported on Autostar I & II)

1 SAO library

2 GCVS library

Meade Telescope Protocol

3 Hipparcos (Autostar I & 2)

4 HR (Autostar I & 2)

5 HD (Autostar I & 2)

Returns:

1 Catalog Available

2 Catalog Not Found

:LSNNNN#

Select star NNNN as the current target object from the currently selected catalog

Returns: Nothing

LX200GPS & AutoStar – Available in later firmwares

M – Telescope Movement Commands

:MA# Autostar, LX 16”, LX200GPS – Slew to target Alt and Az

Returns:

0 - No fault

1 – Fault

LX200 – Not supported

:Me# Move Telescope East at current slew rate

Returns: Nothing

:Mn# Move Telescope North at current slew rate

Returns: Nothing

:Ms# Move Telescope South at current slew rate

Returns: Nothing

:Mw# Move Telescope West at current slew rate

Returns: Nothing

:MS# Slew to Target Object

Returns:

0 Slew is Possible

1<string># Object Below Horizon w/string message

2<string># Object Below Higher w/string message

P - High Precision Toggle

:P# Toggles High Precision Pointing. When High precision pointing is enabled scope will first allow the operator to center a

nearby bright star before moving to the actual target.

Returns: <string>

“HIGH PRECISION” Current setting after this command.

“LOW PRECISION” Current setting after this command.

\$Q – Smart Drive Control

\$Q# Toggles Smart Drive PEC on and off for both axis

Returns: Nothing

Not supported on Autostar

:\$QA+ Enable Dec/Alt PEC [LX200gps only]

Returns: Nothing

:\$QA- Enable Dec/Alt PEC [LX200gps only]

Returns: Nothing

:\$QZ+ Enable RA/AZ PEC compensation [LX200gps only]

Meade Telescope Protocol

-

Returns: Nothing

:\$QZ- Disable RA/AZ PEC Compensation [LX200gpgs only]

Return: Nothing

Q – Movement Commands

:Q# Halt all current slewing

Returns:Nothing

:Qe# Halt eastward Slews

Returns: Nothing

:Qn# Halt northward Slews

Returns: Nothing

:Qs# Halt southward Slews

Returns: Nothing

:Qw# Halt westward Slews

Returns: Nothing

r – Field Derotator Commands

:r+# Turn on Field Derotator [LX 16” and LX200GPS]

Returns: Nothing

:r-# Turn off Field Derotator, halt slew in progress. [Lx 16” and LX200GPS]

Returns Nothing

R – Slew Rate Commands

:RC# Set Slew rate to Centering rate (2nd slowest)

Returns: Nothing

:RG# Set Slew rate to Guiding Rate (slowest)

Returns: Nothing

:RM# Set Slew rate to Find Rate (2nd Fastest)

Returns: Nothing

:RS# Set Slew rate to max (fastest)

Returns: Nothing

:RADD.D#

Set RA/Azimuth Slew rate to DD.D degrees per second [LX200GPS Only]

Returns: Nothing

:REDD.D#

Set Dec/Elevation Slew rate to DD.D degrees per second [LX200GPS only]

Returns: Nothing

:RgSS.S#

Set guide rate to +/- SS.S to arc seconds per second. This rate is added to or subtracted from the current tracking

Rates when the CCD guider or handbox guider buttons are pressed when the guide rate is selected. Rate shall not exceed

sidereal speed (approx 15.0417”/sec)[LX200GPS only]

Returns: Nothing

Meade Telescope Protocol

S – Telescope Set Commands

:SasDD*MM#

Set target object altitude to sDD*MM# or sDD*MM'SS# [LX 16", Autostar, LX200GPS]

Returns:

0 Object within slew range

1 Object out of slew range

:SbsMM.M#

Set Brighter limit to the ASCII decimal magnitude string. SMM.M

Returns:

0 - Valid

1 – invalid number

:SBn# Set Baud Rate n, where n is an ASCII digit (1..9) with the following interpretation

1 56.7K

2 38.4K

3 28.8K

4 19.2K

5 14.4K

6 9600

7 4800

8 2400

9 1200

Returns:

1 At the current baud rate and then changes to the new rate for further communication

:SCMM/DD/YY#

Change Handbox Date to MM/DD/YY

Returns: <D><string>

D = '0' if the date is invalid. The string is the null string.

D = '1' for valid dates and the string is "Updating Planetary Data# #"

Note: For LX200GPS this is the UTC data!

:SdsDD*MM#

Set target object declination to sDD*MM or sDD*MM:SS depending on the current precision setting

Returns:

1 - Dec Accepted

0 – Dec invalid

:SEsDD*MM#

Sets target object to the specified selenographic latitude on the Moon.

Returns 1- If moon is up and coordinates are accepted.

0 – If the coordinates are invalid

:SesDDD*MM#

Sets the target object to the specified selenographic longitude on the Moon

Returns 1 – If the Moon is up and coordinates are accepted.

0 – If the coordinates are invalid for any reason.

:SfsMM.M#

Set faint magnitude limit to sMM.M

Returns:

0 – Invalid

1 - Valid

:SFNNN#

Set FIELD/IDENTIFY field diameter to NNNN arc minutes.

Meade Telescope Protocol

Returns:

0 – Invalid

1 - Valid
:SGDDD*MM#
Set current site's longitude to DDD*MM an ASCII position string
Returns:
0 - Invalid
1 - Valid
:SGsHH.H#
Set the number of hours added to local time to yield UTC
Returns:
0 - Invalid
1 - Valid
:ShDD#
Set the minimum object elevation limit to DD#
Returns:
0 - Invalid
1 - Valid
:SINNN#
Set the size of the smallest object returned by FIND/BROWSE to NNNN arc minutes
Returns:
0 - Invalid
1 - Valid
:SLHH:MM:SS#
Set the local Time
Returns:
0 - Invalid
1 - Valid
:SM<string>#
Set site 1's name to be <string>. LX200s only accept 3 character strings. Other scopes accept up to 15 characters.
Returns:
0 - Invalid
1 - Valid
:SN<string>#
Set site 2's name to be <string>. LX200s only accept 3 character strings. Other scopes accept up to 15 characters.
Returns:
0 - Invalid
1 - Valid
:SO<string>#
Set site 3's name to be <string>. LX200s only accept 3 character strings. Other scopes accept up to 15 characters.
Returns:
0 - Invalid
1 - Valid
:SP<string>#
Set site 4's name to be <string>. LX200s only accept 3 character strings. Other scopes accept up to 15 characters.
Returns:
0 - Invalid
1 - Valid

Meade Telescope Protocol

-
:SoDD*#
Set highest elevation to which the telescope will slew

Returns:

0 – Invalid

1 - Valid

:Sq#

Step the quality of limit used in FIND/BROWSE through its cycle of VP ... SU. Current setting can be queried with :Gq#

Returns: Nothing

:SrHH:MM:T#

:SrHH:MM:SS#

Set target object RA to HH:MM:T or HH:MM:SS depending on the current precision setting.

Returns:

0 – Invalid

1 - Valid

:SsNNN#

Set the size of the largest object the FIND/BROWSE command will return to NNNN arc minutes

Returns:

0 – Invalid

1 - Valid

:SSH:MM:SS#

Sets the local sidereal time to HH:MM:SS

Returns:

0 – Invalid

1 - Valid

:StsDD*MM#

Sets the current site latitude to sDD*MM#

Returns:

0 – Invalid

1 - Valid

:STTT.T#

Sets the current tracking rate to TTT.T hertz, assuming a model where a 60.0 Hertz synchronous motor will cause the RA

axis to make exactly one revolution in 24 hours.

Returns:

0 – Invalid

1 - Valid

:SwN#

Set maximum slew rate to N degrees per second. N is the range (2..8)

Returns:

0 – Invalid

1 - Valid

:SyGPDCO#

Sets the object selection string used by the FIND/BROWSE command.

Returns:

0 – Invalid

1 - Valid

:SzDDD*MM#

Sets the target Object Azimuth [LX 16" and LX200GPS only]

Returns:

Meade Telescope Protocol

0 – Invalid

1 - Valid

T – Tracking Commands

:T+# Increment Manual rate by 0.1 Hz

Returns: Nothing
:T-# Decrement Manual rate by 0.1 Hz
Returns: Nothing
:TL# Set Lunar Tracking Rage
Returns: Nothing
:TM# Select custom tracking rate
Returns: Nothing
:TQ# Select default tracking rate
Returns: Nothing
:TDDD.DDD#
Set Manual rate do the ASCII expressed decimal DDD.DD
Returns: '1'

U - Precision Toggle
:U# Toggle between low/hi precision positions
Low - RA displays and messages HH:MM.T sDD*MM
High - Dec/Az/El displays and messages HH:MM:SS sDD*MM:SS
Returns Nothing

W – Site Select
:W<n>#
Set current site to <n>, an ASCII digit in the range 0..3
Returns: Nothing

? – Help Text Retrieval
:??# Set help text cursor to the start of the first line.
Returns: <string>#
The <string> contains first string of the general handbox help file.
:?+# Retrieve the next line of help text
Returns: <string>#
The <string> contains the next string of general handbox help file
:?-# Retreive previos line of the handbox help text file.
Returns: <string>#
The <string> contains the next string of general handbox help file

Meade Telescope Protocol

Appendix A: LX200GPS Command Extensions
:Aa# Automatically align scope
:\$BAdd# Set Altitude/Dec Antbacklash
:\$BZdd# Set Azimuth/RA Antbacklash
:BD<n># Programmable Reticule Duty Cycle
:F<n># Set Focuer Speed
:g+# Turn on GPS power
:g-# Turn off GPS power
:gps# Stream GPS data
:gT# Updates Time of Day from GPS
:I# Initialize Telescope
:\$QZ+# RA PEC Enable
:\$QZ-# RA PEC Disable
:\$QA+# Dec PEC Enable
:\$QA-# Dec PEC Disable
:RADD.D# Programmable Slew Rates
:REDD.D# Programmable Slew Rates
:RgSS.S# Programmable Guiding Rates
:SBn# Set Baud Rate

ANEXO C COTIZACIÓN PRIMER DISEÑO SENSOR ESTELAR



Piedecuesta (Guatiguará), 6 de septiembre de 2005

DST-028-05

Señor
ING: JULIAN RODRIGUEZ FERREIRA.
tel: 6447260
Bucaramanga.

Atendiendo a su amable solicitud, la Corporación para la Investigación de la Corrosión presenta la oferta económica del servicio descrito a continuación:

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT.	VALOR TOTAL
Mecanizado chapa soporte, tapa fondo, tapa mantenimiento, soporte estelar y cuerpo tambor en aluminio anodinado, tornillo focal, tornillo diafragma, y 6 tornillos de alineación en acero inoxidable, y 2 rieles guía en bronce bajo especificaciones suministradas por planos	1 juego	\$1'990.000	\$1'990.000
IVA (16%)			\$318.400
Total			\$2'308.400

NOTA:

- El material será proporcionado por la CIC.

CONDICIONES COMERCIALES

IVA: 16% (o el vigente al tiempo de facturar)
Validez de la Oferta: Treinta (30) días.
Moneda: Pesos
Tiempo de Entrega: 15 (quince) días hábiles.
Forma de Pago: Contra-Entrega.

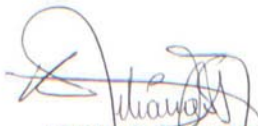
Para realizar el servicio se requerirá una Orden de Trabajo / Compra emitida por el **CLIENTE**.

Km 2 Via Refugio, Guatiguará - Sede UIS, Piedecuesta, Colombia.
Tel: +57 (7) 655 08 07 / 09 Fax: +57 (7) 655 08 08
A.A 40 531 Bucaramanga, Colombia.
e-mail: corincor@telecom.com.co
Nit: 800 254 591 - 3

Cualquier información adicional, gustosamente la suministraremos a través de nuestros teléfonos.

Funcionario Responsable: Fis . Hernán Alfonso Garnica Villamizar. UEN DST.

Cordialmente,



LILIANA MARIA ESTUPIÑÁN
Corporación para la Investigación
de la Corrosión

Cotización NIKON D70



Foto	Descripción	Costo (Dolares)
	Nikon D70 With Sigma Lens Kit	\$1329.99
	Nikon ML-L3 Remote	\$89.99
	Sigma 28-300mm Lens	\$499.99
	Dane Elec 1GB 25X High Speed Memory Card	\$199.99
	Lithium Rechargeable Battery 300 Shots Per Charge	\$89.99
	Precision 3 Piece Filter Set (Multi Coated Glass)	\$99.99
	3 Year International WorldWide Parts Warranty	\$149.99
	Shipping UPS Express Mail 4-6 Days	\$79.60
	International Processing Fee	\$20.00
TOTAL		\$2559.53

WE ACCEPT ALL TYPES OF CREDIT CARDS & PAYPAL

YOU NEED THE 110/240V CAMERA BECAUSE THE OTHER CAMERA WILL NOT CHARGE IN YOUR COUNTRY.

THE CAMERA DOES NOT COME WITH ANY WARRANTY FOR YOUR COUNTRY. THIS IS WHY I OFFERED YOU THE 3 YEAR OR 5 YEAR INTERNATIONAL WARRANTY SO YOU CAN HAVE IT MAINTAINED & REPAIRED IN YOUR COUNTRY IF ANY PROBLEMS DO OCCUR TO YOUR CAMERA.

Junior
 42nd St. Photo
 378 5th Ave.
 New York, NY 10018
 (212)-594-6565-Tel (U.S.A.)
 001-212-594-6565 (International)
 (212)-594-7508-Fax
 (888)-810-4242
Junior@42photo.com
www.42photo.com

