
Universidad de la Laguna

Máster universitario en Astrofísica

TRABAJO FIN DE MASTER

**Nuevo sistema de guiado de los
telescopios nocturnos del
Observatorio del Teide**

Supervisores:

David López Fernández-Nespral
Olga María Zamora Sánchez

Presentado por:

María del Mar Sánchez Andújar

Curso Académico 2023/2024

Resumen

En este trabajo se ha desarrollado un nuevo sistema de auto-guiado fuera de eje para el Telescopio Carlos Sánchez (TCS) del Observatorio del Teide. Para ello se ha diseñado un software que detecta el desplazamiento de las estrellas estimando los cambios de posición del centroide de una estrella guía elegida y genera una señal de error que posteriormente se envía al sistema de control del telescopio para corregirlo. El nuevo sistema de auto-guiado ha sido probado con el instrumento CARONTE, logrando obtener imágenes científicas de alta exposición. Para estimar el rendimiento del guiado de una manera más cuantitativa, se ha medido la FWHM de algunas estrellas y se han comparado con el *seeing* de la noche. Los resultados obtenidos demuestran que el nuevo sistema de auto-guiado es apto para guiar. Por otro lado, se ha automatizado el sistema de auto-guiado del telescopio IAC80 del Observatorio del Teide. La búsqueda de estrellas guías en el telescopio debía hacerse de forma manual con la ayuda de un operador nocturno. En este trabajo se ha implementado un *script* que encuentra estrellas guías de forma automática aprovechando los recursos disponibles y las capacidades del software actual.

Abstract

The quality and efficiency of astronomical observatories are crucial in attracting and supporting high-level research. To provide the scientific community with more efficient and faster services, it is essential to innovate and invest in the modernization of astronomical instrumentation. The advancement of astrophysics is highly dependent on the quality of astronomical observations, necessitating the use of complex and advanced instrumentation. By enhancing these tools and technologies, we can significantly improve the precision and productivity of astronomical research, thereby accelerating discoveries and expanding our understanding of the universe. Since this study focuses on the auto-guiding systems of the Carlos Sánchez Telescope and the IAC80 Telescope in Teide Observatory, the purpose will be to design and/or improve the current systems to enhance the productivity and precision of observations, as well as optimize resources. These telescopes require precise auto-guiding systems to enhance their observational capabilities. Each telescope has a different structure, so the auto-guiding systems cannot be designed identically. For this reason, a preliminary study has been conducted to evaluate the feasibility of the current auto-guiding systems for both telescopes. It has been determined whether it is more feasible to improve the current systems or to implement and develop a new system, always considering the most environmentally friendly and cost-reducing approach. On the one hand, in the Carlos Sánchez Telescope, there was no independent auto-guiding system. Until now, the guiding has been done using the scientific cameras themselves as FastCam or MuSCAT2. The absence of an external system limits the telescope's capabilities, especially considering the future installation of new instruments. In a previous attempt to establish an independent auto-guiding system, a guide telescope was implemented. However, issues with differential flexures prevented its continuation as a viable solution since the effect of flexures is very significant, as well as dependent on the altitude and direction of the telescope. In this work, the feasibility of the off-axis auto-guiding system for the Carlos Sánchez Telescope has been evaluated. The off-axis design offers advantages in terms of stability and accuracy, as it minimizes the potential for differential flexure and other mechanical issues that can affect image quality. For this purpose, a completely new and exclusive off-axis guiding structure for the telescope has been designed by David Nespral (Support Astronomer) and Saul (Electrical Engineer). Also, a software has been designed to detect the displacement of stars by estimating the position changes of a chosen guide star's centroid and generating an error signal, which is then sent to the telescope's control system for correction. The new auto-guiding system has been tested with the CARONTE instrument during the service nights for the Carlos Sánchez Telescope, successfully obtaining scientific images with high exposures. To estimate the guiding performance in a more quantitative way, the FWHM of some stars was measured and compared with the night's seeing. The results obtained demonstrate that the new auto-guiding system is suitable for guiding. Furthermore, the new auto-guiding system for the TCS could be adapted to a wider range of instruments, as they would no longer need to contain their own auto-guiding system to operate on the telescope. This represents a significant advantage for future observations and research projects. Additionally, it is projected that in the future, an acquisition box will be constructed that will permanently house the auto-guiding system, along with the other instruments offered at the TCS. This way, using a mirror, the light will be reflected towards the instrument in use with the possibility of utilizing the designed auto-guiding system, thus avoiding continuous installations and uninstallations. On the other hand, the IAC80 telescope has an independent off-axis auto-guiding system. The current system is functional but the search for guide stars in the telescope was not automated and had to be done manually with the help of a telescope operator. This becomes a problem since universities frequently use the telescope remotely

and in person. The ideal situation would be that any university with remote access to the telescope can use all the tools absolutely without external intervention. For this reason, the auto-guiding system of the IAC80 telescope at the Teide Observatory has been automated. In this context, it was deemed feasible to reuse and improve the current system to fully automate it. This alternative was considered simpler, more optimal, and more economical than a complete replacement of the actual auto-guiding system in the IAC80. In this work, a script has been implemented to find guide stars automatically, utilizing the available resources and capabilities of the current software. The designed script returns a list of the brightest stars given the field of view under study, along with a visual representation of the position of the stars in the search area of the camera finder. The visualization features an interactive Aladin environment, meaning it is possible to simultaneously view the actual field of the stars proposed as potential guides and the field of view of the scientific object. Currently, the new tool is used by both telescope operators and universities, remotely and in person. In the same way, the Aladin visualization tool has proven to be very useful for observers in other areas, as in addition to being able to very illustratively identify the guide stars, it is a practical and quick resource for comparing the detector image with the Aladin field. Finally, in this work it can be said that the advancements developed for the auto-guiding systems of the Carlos Sánchez Telescope and the IAC80 Telescope improve the operability and accessibility of the Teide Observatory telescopes. For both auto-guiding systems, sustainability and cost reduction have been prioritized. Efforts have been made to ensure that the contributions can be applied in other fields or contexts. In other words, our system proposals have been designed to be versatile. It is thus concluded that a significant modernization of the facilities is possible without the need for substantial additional investments.

Índice

1	Introducción	6
1.1	Sistemas de auto-guiado	6
1.2	Sistemas de auto-guiado en el observatorio del Teide	9
1.2.1	Sistemas de auto-guiado en el TCS	10
1.2.2	Sistema de auto-guiado en el IAC80	12
2	Motivación y objetivo	14
3	Metodología	15
3.1	Nuevo sistema de auto-guiado para el TCS	15
3.1.1	Desarrollo del software para el proceso de guiado	16
3.1.2	Ajuste de orientación del buscador en el sistema de control del telescopio	22
3.1.3	Criterios de guiado	23
3.1.4	Pruebas experimentales	24
3.1.5	Funciones complementarias del sistema de auto-guiado fuera de eje: Centralización del apuntado para FastCam	25
3.2	Modificaciones en el sistema de auto-guiado del IAC80	26
3.2.1	Pruebas experimentales para encontrar la relación lineal entre movimiento del carro X-Y y coordenadas de cielo de la estrella guía	27
3.2.2	Desarrollo del software de automatización	28
4	Resultados y discusión	29
4.1	Evaluación del nuevo sistema de auto-guiado del TCS	29
4.2	Automatización del sistema de auto-guiado del IAC80	31
5	Conclusiones	32
	Referencias	33

1 Introducción

La Astrofísica es una ciencia observacional, toda la información que tenemos ha sido construida principalmente en base a los fotones que recibimos de los objetos astronómicos. El avance en esta rama de la ciencia depende en gran medida de la calidad de las observaciones astronómicas, lo que exige de una instrumentación compleja y avanzada y posteriormente de un tratamiento adecuado de los datos.

Durante el avance en la instrumentación astronómica y la adquisición de datos, han ido surgiendo nuevos desafíos. En este trabajo se va a tratar un reto fundamental para las observaciones: **mantener el telescopio apuntando con precisión al objeto que se está observando, utilizando lo que se conoce como sistema de auto-guiado**. Como se intuye, está es una de las funciones principales que debe ejecutar cualquier telescopio de carácter profesional para obtener datos de manera continua y de buena calidad. Si el telescopio no sigue con suficiente precisión el objeto de interés, el movimiento relativo entre el telescopio y el objeto resultará de una imagen borrosa y alargada, siendo este problema más notable para largas exposiciones. Como motivación a esta dificultad, surgen los sistemas de auto-guiado, cuya función es corregir automáticamente los pequeños desplazamientos del telescopio, garantizando la estabilidad necesaria para obtener imágenes nítidas y detalladas durante las observaciones.

En la próxima Sección, se abordará en detalle el funcionamiento y las características principales de los sistemas de auto-guiado. Además, se expondrá el funcionamiento de los sistemas de auto-guiado de los telescopios nocturnos del Observatorio del Teide, sobre los cuales se enfoca este trabajo.

1.1 Sistemas de auto-guiado

El primer paso para mantener el objeto celeste en el campo de visión es escoger una montura adecuada para el telescopio. Los principales tipos de monturas utilizadas para los telescopios terrestres son las monturas ecuatoriales y las monturas altazimutales. Las monturas, con sus correspondientes motores, compensarán la rotación de la tierra, manteniendo el objeto dentro del campo de visión de manera continua, lo que se conoce como **seguimiento (*tracking*)**. Sin embargo, si se pretende ofrecer datos de calidad se deben tener en cuenta aquellos factores que pueden afectar a la perturbación del seguimiento del objeto. Uno de los factores más sensibles se da con la toma de **imágenes de larga exposición**, si el seguimiento no es lo suficientemente preciso, cualquier mínimo desplazamiento puede dar como resultado una imagen borrosa y elongada. Esto hace necesario reajustar el apuntado continuamente para contrarrestar el movimiento aparente. El seguimiento de un objeto también puede ser inestable debido a las turbulencias atmosféricas que haya durante la noche. Las turbulencias distorsionan la luz de los objetos celestes, afectando la calidad de las imágenes obtenidas. El sistema de auto-guiado también detecta y compensa estas perturbaciones de manera automática, manteniendo la estabilidad y la nitidez de las imágenes. Estos detalles, hacen que cualquier telescopio terrestre de carácter profesional disponga de un sistema de auto-guiado (Kitchin 2003 [1]).

Cualquier sistema de auto-guiado tiene que ser capaz de **detectar el desplazamiento de las estrellas entre un intervalo de tiempo dado y generar una señal de error que posteriormente se envíe al sistema de control del telescopio para que lo corrija**. Un método muy común y eficaz para detectar el desplazamiento de las estrellas es utilizar un segundo detector, que se denominará como **cámara guía o buscador** (por ejemplo, un detector CCD). La imagen guía se lee a intervalos frecuentes y cualquier movimiento del objeto se sigue y se detecta mediante un software que genera las señales de corrección y posteriormente se las envía al telescopio. Pueden encontrarse diferentes algoritmos para sistemas de auto-guiado en Kitchin 2003 [1], McCormac et al. (2013) [2], o Laing [3].

Existen varias formas de acoplar el sistema de auto-guiado a la mecánica del telescopio (Jelley 1980 [4]). Se van a exponer las relevantes para este trabajo:

- **Telescopio guía o *guidescope***. El telescopio guía es un segundo telescopio acoplado al telescopio principal y alineado con él. Habitualmente este tipo de acoplamiento es más común para telescopios de aficionados. Para el caso de telescopios profesionales, la cámara guía irá conectada seguida del telescopio guía. En la Figura 1 se puede ver un ejemplo de como se acoplaría el telescopio guía a un telescopio profesional.

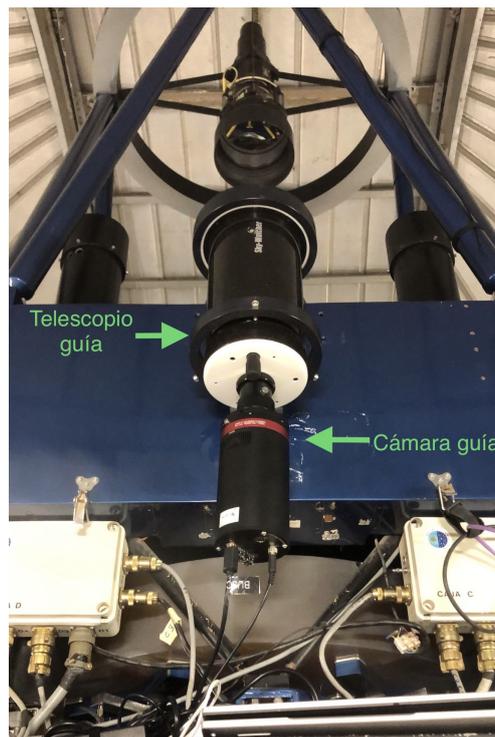
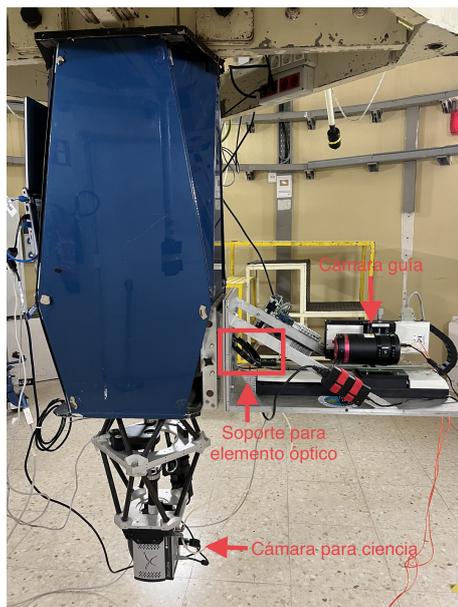


Figura 1: Telescopio IAC80 del Observatorio del Teide con el telescopio guía y la cámara guía acoplados y alineados al telescopio principal.

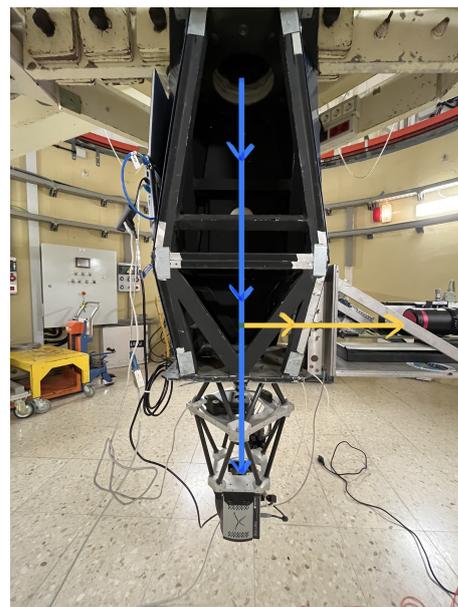
El método del telescopio guía como sistema de auto-guiado suele presentar un problema conocido como **flexiones diferenciales** [5]. Las flexiones ocurren cuando el telescopio está apuntando al objeto deseado mientras que el telescopio guía no está centrado exactamente en el mismo campo. Esto puede ocurrir por pequeños desplazamientos en el tubo del telescopio guía, en el espejo primario o secundario,

en los instrumentos, en los anillos de sujeción.. Cualquier pequeño desplazamiento puede provocar que el eje óptico no sea el mismo y afectar notablemente al sistema. Si se decide utilizar un telescopio guía hay que asegurarse de que las flexiones no sean un problema. Mecánicamente se buscará la estructura más rígida y estable posible. Por otro lado, es posible encontrar o realizar softwares¹ que guíen corrigiendo los diferentes desplazamientos debido a flexiones.

- **Guiado fuera de eje o *off-axis*.** En este tipo de sistemas se desvía una fracción de la luz del telescopio principal mediante divisores de haz, espejos dicróicos o interceptando una fracción del haz principal con un pequeño espejo. Un divisor de haz desvía un pequeño porcentaje de la radiación hacia la cámara guía mientras que la restante es para el detector principal. Un dicróico tiene una longitud de onda de corte a partir de la cual toda la luz se transmitirá y la restante se reflejará. Por último, el espejo refleja luz del rayo incidente, usualmente de una región del campo de visión que la cámara científica no utiliza. En el artículo de Kim et al. (2011) [6] se puede ver un ejemplo de diseño de sistema de guiado fuera de eje. En la Figura 2a se muestra el sistema de auto-guiado fuera del eje del Telescopio Carlos Sánchez, mientras que en la Figura 2b se puede observar la trayectoria de la luz. El elemento óptico, se introduce en el camino óptico (intersección entre color azul y amarillo) desviando una fracción de luz hacia el buscador.



(a) Sistema de auto-guiado con guiador fuera de eje para el Telescopio Carlos Sánchez. El detector instalado es FAST-CAM, el elemento dispersor no está colocado.



(b) Trayectoria del haz de luz para un guiador fuera de eje que desvía una fracción de luz mediante dicróico o divisor de haz.

Figura 2: Sistema de auto-guiado fuera de eje para el telescopio Carlos Sánchez.

¹Ejemplo de software para corregir flexiones (<http://www.astrogeeks.com/AstroGeeks/andre/FlexRX/FlexRX2.htm>)

Algunas cámaras científicas pueden utilizar sus propias imágenes para el guiado. Esta alternativa funciona bien si el tiempo de exposición es lo suficientemente pequeño como para corregir cualquier desplazamiento del telescopio a lo largo del tiempo. No es usual que las cámaras científicas utilicen sus propias imágenes para el guiado, por lo que cuando un telescopio se basa únicamente en el sistema de guiado de su cámara científica, existe la posibilidad de que futuros cambios de instrumentación no sean compatibles con este sistema. Por esta razón, resulta siempre beneficioso contar con sistemas independientes de la cámara científica, asegurando así la continuidad y eficacia del guiado incluso ante cambios en los instrumentos del telescopio a lo largo del tiempo.

Tras acoplar el sistema de auto-guiado en el telescopio, el buscador se encargará de seguir el movimiento del objeto y generar las señales de error mediante un software. La señal de error se calcula en función de las variaciones de la posición del objeto. Cualquier pequeño cambio en la posición queda reflejado en la señal de error, lo que subraya la importancia de estimar con precisión cualquier desviación. Por este motivo, es más conveniente **no guiar directamente con el objeto científico de interés**, puesto que sus características pueden no ser las más adecuadas para estimar su posición, por ejemplo, un objeto extenso o demasiado débil incrementaría la dificultad para calcular variaciones en la posición. Guiar sobre objetos que no son el objeto científico se denomina **guiado en *off-set*** (Kitchin 2003 [1]). Así pues, se seleccionará una estrella dentro del campo de visión del buscador lo suficientemente brillante para que el auto-guiado pueda realizar las correcciones que posteriormente enviará al telescopio para que compense el movimiento de la imagen a tiempo real.

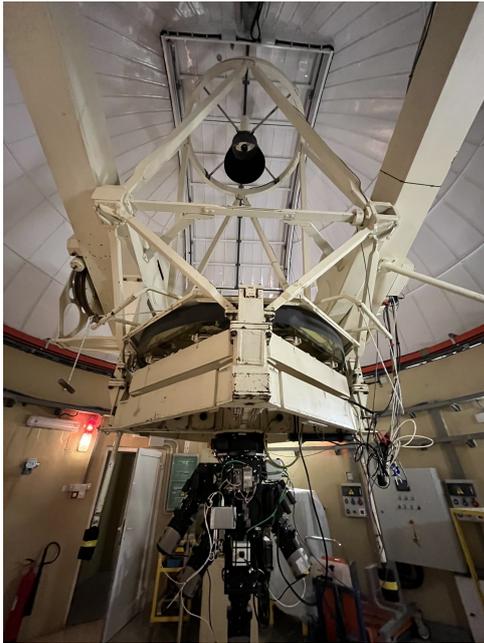
1.2 Sistemas de auto-guiado en el observatorio del Teide

El **Observatorio del Teide (OT)** está situado en Izaña, Tenerife, a una altura de 2390 m. Debido a su situación geográfica y la calidad de los cielos de Canarias, el OT alberga telescopios tanto solares como nocturnos [7].



Figura 3: Observatorio del Teide, Izaña, Tenerife [8].

Los telescopios nocturnos del OT en los que se han desarrollado los sistemas de guiado para este trabajo son el **Telescopio Carlos Sánchez (TCS)** y el **telescopio IAC80**, ambos están dirigidos por el grupo de operaciones telescópicas del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC). El telescopio Carlos Sánchez cuenta con un espejo primario de 1.52 metros, está especialmente diseñado para realizar observaciones en el rango infrarrojo y lleva operando desde 1972 [9]. Por otro lado, el telescopio IAC80, esta diseñado para observar en el rango visible, el espejo primario es de 82 cm y comenzó a operar en el año 1993 [10]. Ambas monturas son ecuatoriales. En la Figura 4 pueden verse los telescopios.



(a) Telescopio Carlos Sánchez en el observatorio del Teide, Tenerife.



(b) Telescopio IAC80 en el observatorio del Teide, Tenerife.

Figura 4: Telescopios nocturnos: TCS y IAC80 en el observatorio del Teide.

En las siguientes Secciones, se presentará un análisis detallado de los sistemas de auto-guiado utilizados antes de la implementación de los nuevos sistemas propuestos para este trabajo en el Telescopio Carlos Sánchez y el telescopio IAC80.

1.2.1 Sistemas de auto-guiado en el TCS

Actualmente en el Telescopio Carlos Sánchez se están utilizando dos instrumentos: Fast-Cam [11] y MuSCAT2 [12]. Ambos instrumentos pueden guiar sin necesidad de un sistema externo. FastCam utiliza sus propias imágenes y MuSCAT2 una de las cuatro cámaras que posee. En consecuencia, si en el futuro se utilizan nuevos instrumentos que carecen de sistemas de auto-guiado propios, las observaciones estarán significativamente limitadas, lo que impedirá la realización de exposiciones prolongadas y la captura de imágenes con la máxima precisión posible. Por ello, es de vital importancia diseñar un sistema de auto-guiado externo para el TCS.

La primera implementación que se propuso fue acoplar un telescopio guía. Este método destacó sobre los demás dado que presentaba dos grandes ventajas. En primer lugar, la simplicidad. Este tipo de sistema posee un montaje muy sencillo y rápido de instalar. En segundo lugar, su bajo coste. Un telescopio guía no implica un gasto elevado. En la Figura 5 se muestra la instalación del telescopio guía en el TCS. El buscador no está acoplado en esta imagen, pero se coloca unido al telescopio guía de manera similar a como se ha ilustrado en la Figura 1.

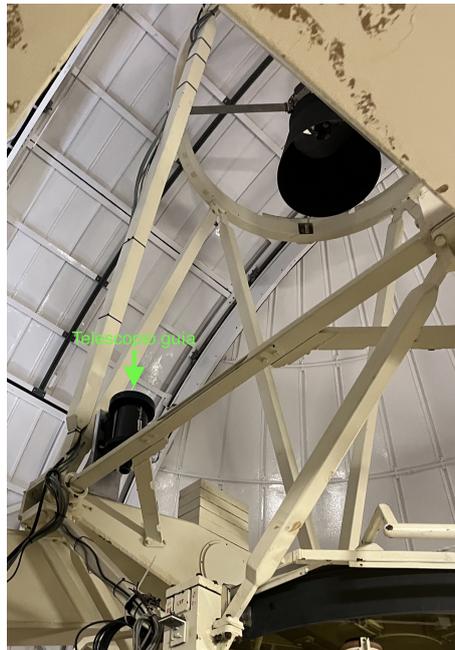


Figura 5: Telescopio Carlos Sánchez del Observatorio del Teide con telescopio guía acoplado y alineado al telescopio principal.

Las primeras pruebas demostraron que este sistema no estaba siendo efectivo para realizar el auto-guiado, puesto que las imágenes resultantes estaban movidas con las estrellas elongadas. Con el fin de identificar si las dificultades en el guiado estaban relacionadas con las **flexiones diferenciales**, se llevó a cabo un sencillo experimento para investigar el tema. El experimento consistió en apuntar varias estrellas, centrarlas en el buscador en una posición concreta y tomar una imagen con el instrumento, en este caso, MuSCAT2. Como el telescopio guía y el telescopio principal deben estar alineados, si se centra una estrella en una posición fija del buscador (En este caso, el centro del buscador), también se centrará en una posición fija en la cámara científica. Este experimento se realizó para cinco estrellas en diferentes posiciones, en el cenit, y en los cuatro puntos cardinales.

En la Figura 6 se muestra la imagen de MuSCAT2 con la estrella que se seleccionó en el cenit. Esta estrella se centró en el centro del buscador, por lo que dicha posición se corresponde a la señalada en rojo en la cámara científica. Independientemente de la estrella que se apunte, si se centra siempre en el mismo punto del buscador, se esperaría que cualquier estrella apareciera en el punto rojo en el campo de visión del instrumento. Para mostrar los resultados de las posiciones de las estrellas que se apuntaron en los cuatro puntos cardinales, se ha señalado en la imagen con diferentes colores (Un color para cada punto cardinal) las posiciones de las estrellas en la cámara científica tras centrarlas

en el campo del buscador. Los resultados que se obtuvieron fueron muy reveladores, claramente la cámara de guiado no esta en el mismo eje que la de ciencia. Se puede ver como las posiciones de las estrellas en los cuatro puntos cardinales, están muy desplazadas de la posición del centro de la cámara científica (Posición roja: Posición del cénit). Al margen de la imagen se muestra la distancia cenital (ZD) en el caso del norte y el sur.

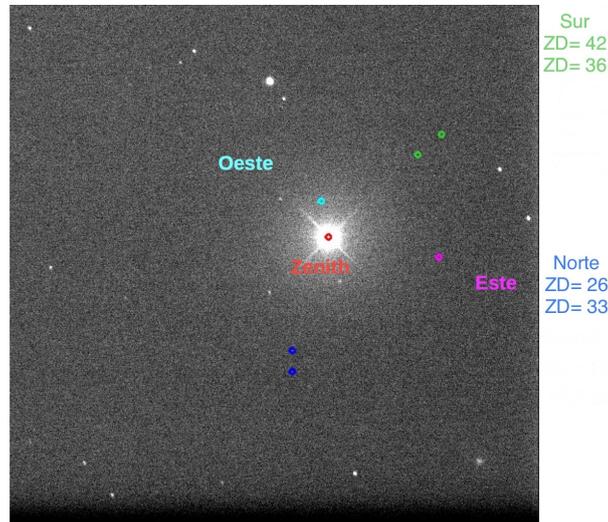
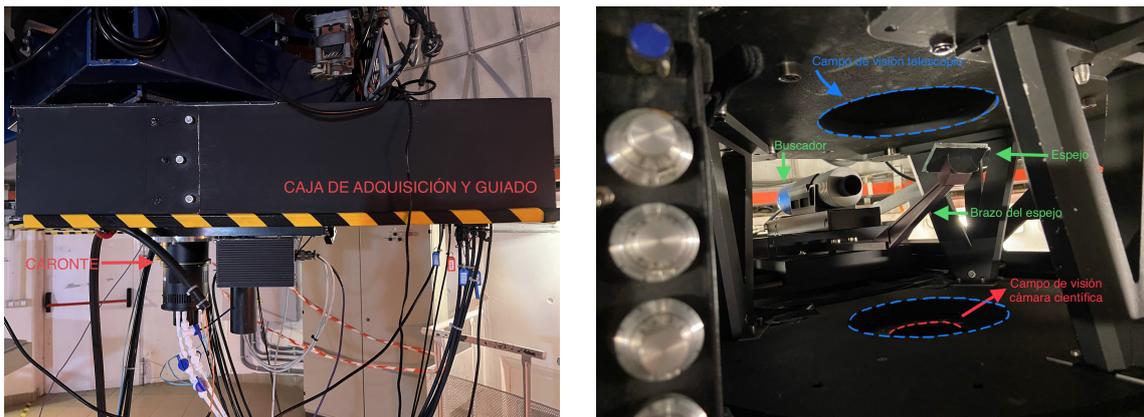


Figura 6: Pruebas realizadas por Rosa Clavero (Astronoma de soporte) con MuSCAT2 en el TCS para exponer los problemas de flexiones utilizando un telescopio guía como sistema de auto-guiado.

Estos datos indican que **el efecto de las flexiones es muy significativo, además de dependiente de la altitud y la dirección**. Los efectos son mucho más notables en el norte y el sur, lo que sugiere que existe una gran variedad de flexiones que incrementan o disminuyen en función de hacia donde este cayendo el peso del telescopio. Este hallazgo descartó el telescopio guía como un sistema viable de auto-guiado. No se consiguió resolver el problema de las flexiones dado que, no se identificó un único elemento afectado por este efecto sino una combinación de múltiples. Estas pruebas también fueron realizadas en el telescopio IAC80 con CAMELOT2 obteniendo unos resultados similares. Es así cómo se comenzó a considerar el guiado fuera de eje como sistema de auto-guiado para el TCS. Con este sistema, al utilizar el mismo rayo de luz para el buscador y la cámara científica, cualquier efecto externo afecta de igual manera a ambas cámaras y se compensa. Además, es un sistema con el que se espera poder conseguir mucha precisión.

1.2.2 Sistema de auto-guiado en el IAC80

El sistema de auto-guiado en el IAC80 es un sistema de guiado fuera de eje que utiliza un pequeño espejo para desviar una fracción de luz del telescopio. En la Figura 7a se observa la caja de adquisición y guiado instalada con el instrumento CARONTE [13]. La caja está pensada para que se puedan instalar los instrumentos de uso común del IAC80 (CARONTE y CAMELOT2 [14]). Aún así, se pueden instalar otros siempre que su tamaño no sea mayor que el de la instrumentación actual.



(a) Caja de adquisición y guiado instalada en el IAC80.

(b) Interior de caja de adquisición y guiado instalada en el IAC80.

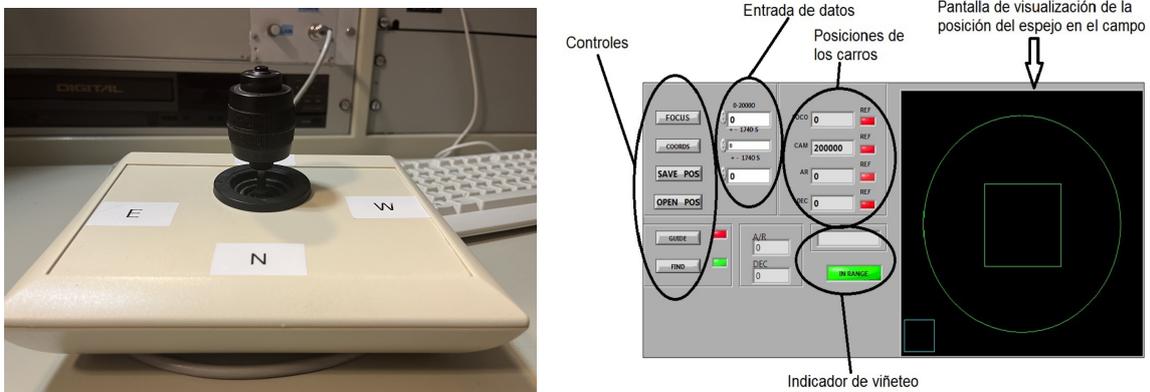
Figura 7: Interior y exterior de caja de adquisición y guiado del IAC80.

Mecánicamente, el sistema consta de un brazo en cuyo extremo se monta un espejo rectangular que desvía la luz a la cámara de guiado. En la Figura 7b puede verse la estructura interna de la caja de guiado. La luz entra por el campo de visión del telescopio (región delineada con azul), pero la cámara solo recibe la luz que pasa por el campo de visión de la cámara científica (región delineada con rojo). El área entre el límite del campo de visión del telescopio y el de la cámara científica, es el **campo de visión del buscador**. En esta zona el espejo se mueve para buscar una estrella guía y reflejar la luz hacia el buscador. El movimiento lo permite un carro denominado **carro X-Y**. No es posible buscar una estrella guía dentro del interior del campo de visión de la cámara científica porque físicamente el brazo da lugar a viñeteo. El **viñeteo** también puede ocurrir en regiones cercanas al área del campo de visión de la cámara científica. Para ello, el brazo está unido a un carro denominado **carro de cuarto eje** que es capaz de desplazarlo de la zona de viñeteo mientras que mantiene el espejo reflejando la luz de la estrella de interés. Por último, la cámara va fija al **carro de enfoque** que puede mover ligeramente la cámara para enfocar. En la Figura 8 se expone la posición de los carros.



Figura 8: Carros del interior de la caja de guiado del IAC80.

Se utiliza el **guiado en *off-set***, es decir, se guía con una estrella de guiado diferente al objeto científico de interés. La búsqueda de dicha estrella se hace mediante un *joystick*. El *joystick* actúa sobre el carro X-Y y puede desplazarse simultáneamente en los dos ejes. En la Figura 9 se muestra el software de control del sistema de auto-guiado y el *joystick*. El **cuadrado azul de la pantalla de visualización es la posición del espejo en el campo** y se desplaza utilizando el *joystick*. El **cuadrado verde es el área que ve la cámara científica mientras que el círculo marca los límites del campo del telescopio**. El espejo siempre se moverá dentro del campo de visión del telescopio (círculo verde), pero fuera del campo de visión de la cámara científica (cuadrado verde), por los motivos descritos previamente. Por último, se puede identificar cuando se ha encontrado una estrella guía por medio de otra interfaz que muestra que está viendo el buscador. De manera que, cuando se identifique una estrella brillante y enfocada, detendremos el movimiento del carro y se seleccionará como estrella guía.



(a) *Joystick* para controlar los carros X-Y del sistema de auto-guiado del IAC80.

(b) Pantalla de software de control del sistema de auto-guiado del IAC80.

Figura 9: *Joystick* y pantalla de visualización del software del sistema de auto-guiado del IAC80.

El principal inconveniente de este método es la falta de automatización. El telescopio IAC80 es utilizado frecuentemente por universidades de todo el mundo presencial y remotamente. La dependencia del *joystick* para encontrar estrella guía impide que una universidad conectada al telescopio remotamente pueda realizar sus observaciones de manera independiente. Siempre será necesario que haya un operador en el telescopio durante las observaciones.

2 Motivación y objetivo

La calidad y la eficiencia de los observatorios astronómicos juega un papel fundamental para atraer y apoyar investigaciones de alto nivel. Si se pretende ofrecer servicios más eficientes y rápidos a la comunidad científica es esencial innovar e invertir en la modernización de la instrumentación astronómica. Dado que este estudio se centra en los sistemas de auto-guiado del telescopio Carlos Sánchez y el telescopio IAC80, el **propósito**

será diseñar y/o mejorar los sistemas actuales para que contribuyan a la productividad y precisión de las observaciones, así como la optimización de los recursos. Cada telescopio tiene una estructura diferente, por lo que los sistemas de auto-guiado no pueden diseñarse de forma idéntica. Por este motivo, se ha llevado a cabo un estudio previo para evaluar la viabilidad de los sistemas de auto-guiado actuales para ambos telescopios. Se ha determinado qué es más factible, si mejorar los sistemas actuales o implementar y desarrollar un nuevo sistema. Siempre teniendo en cuenta cual es la vía más favorable para el medio ambiente y que reduzca los costes.

- En el **telescopio Carlos Sánchez** no existía un sistema de auto-guiado independiente, hasta ahora se ha estado usando el de las propias cámaras científicas. La ausencia de un sistema externo limita la capacidad del telescopio, especialmente considerando futuras instalaciones de nuevos instrumentos. En un intento previo por establecer un sistema de auto-guiado independiente, se implementó un telescopio guía. Sin embargo, los problemas con las flexiones impidieron su continuidad como solución viable. Como parte de este trabajo, se ha evaluado la viabilidad de un sistema de auto-guiado fuera de eje para el Telescopio Carlos Sánchez. La estructura ha sido construido con material reciclado por Saul (Ingeniero eléctrico) y David Nespral (Astrónomo de soporte). Se ha desarrollado un software para guiar y se ha llevado a cabo un conjunto de observaciones experimentales para verificar su efectividad y rendimiento en condiciones reales.
- Por otro lado, el **telescopio IAC80** posee un sistema de auto-guiado independiente. El problema de este sistema es que no está automatizado. El telescopio es utilizado con frecuencia remotamente por numerosas universidades, por lo que la falta de automatización crea la necesidad de contar con un operador en el telescopio durante las observaciones. En este contexto, se consideró viable reutilizar y mejorar el sistema actual para automatizarlo completamente. Esta alternativa se consideró más sencilla, óptima y económica que un reemplazo completo.

3 Metodología

A continuación, se describe la metodología que se seguirá para llevar a cabo la implementación del nuevo sistema de auto-guiado para el telescopio Carlos Sánchez, así como la modernización del sistema de auto-guiado del telescopio IAC80.

3.1 Nuevo sistema de auto-guiado para el TCS

Tras no funcionar el telescopio guía como sistema de auto-guiado para el TCS (ver Subsección 1.2.1), se dio paso a la implementación del guiado fuera de eje como nuevo sistema. Este sistema fue construido por Saul (ingeniero eléctrico) y David Nespral (Astrónomo de soporte) con materiales reciclados. En la Figura 2 se muestra el sistema de auto-guiado fuera de eje, mientras que en la Figura 10 puede verse la estructura con más detalle.

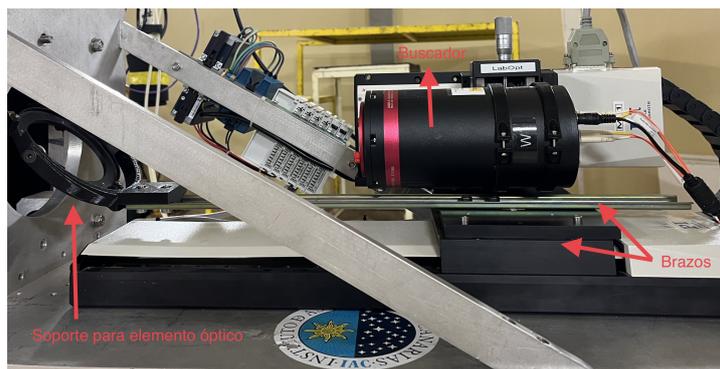


Figura 10: Estructura de guiador fuera de eje para el TCS.

El sistema de guiado está formado por dos brazos, un divisor de haz y la cámara buscador. Uno de los brazos sirve para introducir el divisor de haz, mientras que el otro se utiliza para enfocar la cámara. El buscador es una cámara CMOS para el rango visible. Su caracterización puede verse en la web de QHYCCD [15], mientras que su eficiencia cuántica puede verse en la Figura 11.



Figura 11: Eficiencia cuántica de la cámara buscador del sistema de auto-guiado del Telescopio Carlos Sánchez [15].

El elemento óptico utilizado para este estudio fue un divisor de haz por lo motivos descritos en la Subsección 3.1.5.

3.1.1 Desarrollo del software para el proceso de guiado

El desarrollo del software para el nuevo sistema de auto-guiado se ha basado en la creación de dos funciones dentro del entorno de programación de *python*². A través de estas funciones se detectará el desplazamiento de las estrellas estimando los cambios de posición del centroide de una estrella guía elegida (guiado en *off-set*). Las variaciones en la posición serán la señal de error que posteriormente se enviará al sistema de control del telescopio para compensar el movimiento aparente. A continuación, se detallan ambas funciones y se explica su funcionamiento.

²<https://www.python.org/>

La primera función tiene como objetivo principal encontrar la estrella guía y calcular las coordenadas de su centro. La estrella guía debe ser una estrella brillante, pues proporcionará ventajas significativas en términos de detección fiable, estabilidad y precisión en el seguimiento del telescopio. Por consiguiente, la elección de la estrella es una parte fundamental del proceso y debe ser realizada cuidadosamente. El cálculo del centroide de la estrella también es un proceso importante, puesto que antes de comenzar a generar la señal de error, **debe estimarse el centro de la estrella guía para recentrar la imagen y realizar recortes del detector**. A continuación se detallan los pasos fundamentales que cumple la función.

- En primer lugar, se tomará una primera y única imagen con tiempo de exposición de varios segundos (en torno a los 10 s), para poder identificar las estrellas más brillantes del campo.
- Con la imagen capturada, se escoge estrella de guiado. El método de elección de la estrella guía se ha planteado tanto de manera manual como automática. El modo manual despliega la imagen que se ha tomado y permite seleccionar la estrella guía que el usuario desea pulsando sobre ella. Con objetivo de afinar y recentrar los píxeles del centro de la estrella se hace zoom en la estrella elegida y se volverá a pulsar sobre el centro. En la Figura 12 pueden verse los desplegables con los que el usuario interactúa.

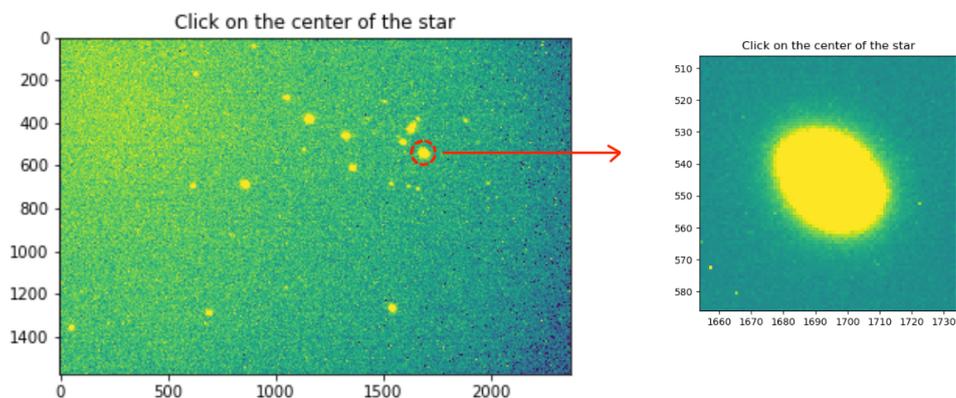


Figura 12: Esquema de ventanas emergentes para seleccionar estrella de guiado utilizando el método manual.

Por otro lado, el modo automático persigue la misma idea, con la diferencia de que no es el usuario quien escoge la estrella guía si no que se detecta automáticamente mediante el código. Para ello, se utiliza el método de *python DAOSStarFinder*³. Este método busca picos en la imagen que excedan un cierto umbral por encima del fondo estimado y tengan una distribución de intensidad que se asemeje a una estrella, es decir, picos de intensidad rodeados de regiones de intensidad menor. Para la detección de estrellas se fijó una anchura a media altura (FWHM) de 3 píxeles y un umbral de detección de 5 veces la desviación estándar de fondo. El método devuelve una tabla con parámetros de interés de las estrellas detectadas. Se seleccionan

³Algoritmo para detectar estrellas: <https://photutils.readthedocs.io/en/stable/api/photutils.detection.DAOSStarFinder.html>

tanto las coordenadas de sus centros como sus flujos, para poder identificar cuál es la estrella más brillante. Ordenando la tabla de mayor a menor flujo, la primera estrella será la más brillante y por lo tanto la seleccionada para guiar. No obstante, durante las pruebas en telescopio, se optó por no utilizar el método automático dado que presentaba dos inconvenientes. En primer lugar, si la estrella brillante quedaba en el borde del detector o cerca de él, el algoritmo generaba errores. En segundo lugar, si dentro del campo de visión había un objeto más brillante que no era una estrella, por ejemplo, el bulbo de una galaxia, confundía el objeto con la estrella más brillante. Para evitar estas complicaciones y simplificar el proceso, se decidió reducir el software al método manual, quedando pendiente para el futuro el desarrollo de un algoritmo mejorado que permita la automatización del proceso.

- Con la estrella guía seleccionada y la primera aproximación de los centros de coordenadas, se extraen los datos de la estrella en un área específica definida por un *offset* (desplazamiento) de 40 píxeles alrededor del centro de coordenadas de la estrella previamente estimado. A partir de estos datos se calculará el centroide de la distribución bidimensional de manera más exacta utilizando la función de *python centroid_2dg*⁴. Esta función ajusta los datos a una distribución gaussiana en dos dimensiones cuyos parámetros son la media en cada dimensión, la desviación estándar en cada dimensión y la covarianza entre las dos dimensiones. En la Figura 13 puede verse un ejemplo ilustrativo.

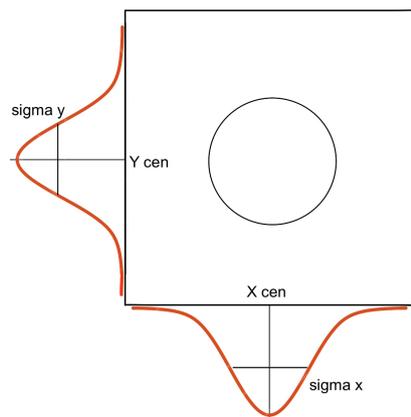


Figura 13: Cálculo del centro de la estrella mediante un ajuste gaussiano en dos dimensiones. Se trabaja con un recorte del detector completo de 40x40 píxeles centrado aproximadamente en el centro de la estrella.

Los centros (X_{cen} y Y_{cen}) que devuelve la función, se utilizan para recortar el detector. Para generar la señal de error se debe calcular de manera continua e iterativa el centro de la estrella guía, por lo que se leerán más cantidad de imágenes en menos tiempo. Con el objetivo de agilizar el proceso, la toma de imágenes en el chip se reduce a la región centrada en las coordenadas X_{cen} y Y_{cen} con un tamaño de 80 píxeles en cada eje. Las imágenes de guiado serán más pequeñas pero se leerán más rápido. El recorte del detector se realiza utilizando una de las funciones de fabrica que contiene la cámara buscador, solo es necesario especificar el centro de

⁴Algoritmo para calcular el centro de un array: https://photutils.readthedocs.io/en/stable/api/photutils.centroids.centroid_2dg.html

coordenadas referidas a los ejes del detector completo, la anchura en el eje x y la anchura en el eje y. Una vez que se fijan dichos parámetros, todas las imágenes que toma la cámara automáticamente son recortadas en el área especificada. En la Figura 14 se muestra un esquema del recorte del detector. **Es importante que los centros se hayan estimado de la forma más exacta posible, ya que si se recorta mal el detector la estrella guía puede quedar fuera del campo de visión y el proceso de guiado dará error.**

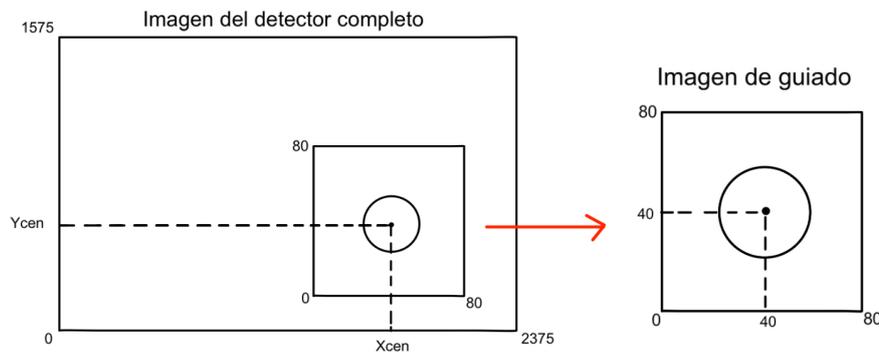


Figura 14: Proceso de recorte del detector completo para obtener el formato de la imagen de guiado.

La segunda función se encarga de realizar el proceso de guiado. Es decir, calcula la señal de error y la comunica al telescopio para corregir el movimiento. Para ello, mediante un bucle se tomarán iterativamente imágenes recortadas del detector con corto tiempo de exposición (300 ms), a este tipo de imagen se le denominará **imágenes de guiado**. De las imágenes de guiado se calculará el centro y **las variaciones de sus centroides serán la señal de error**. A continuación, se detallan los pasos principales que sigue la función.

- Para calcular las variaciones de los centroides, se establece un centro de referencia que se adquiere de la primera imagen de guiado. Esta imagen es la **imagen de referencia**, tiene las mismas características que el resto de imágenes de guiado con la diferencia de que es la primera que se toma, se calcula fuera del bucle y el resto de imágenes se compararan con esta. Así pues, el centro de referencia se calcula utilizando la función de *python centroid.com*⁵. Esta función calcula el centro estimando el centro de masas de la distribución. Como parámetros necesita un valor aproximado del centro de la estrella para luego converger al valor exacto. El valor que se le proporciona es el centro geométrico de la imagen ($x=40, y=40$), que debe coincidir aproximadamente con el centro de la estrella. El valor que se estime serán las **coordenadas de referencia**. Durante las pruebas en telescopio, se detectó que la función *centroid.com* no estimaba correctamente el centro de la distribución si las estrellas seleccionadas eran débiles. Este problema se resolvió ajustando el

⁵ Algoritmo para calcular el centro de un array: <https://photutils.readthedocs.io/en/stable/api/photutils.centroids.centroid.com.html>

parámetro de entrada de la función para el centro de la distribución al valor del píxel máximo en lugar del centro geométrico de la imagen.

- Con el centro de referencia calculado, se puede comenzar el bucle en el que se calcularán las señales de error. El algoritmo tomará una imagen de guiado de 300 ms, calculará su centro de la misma forma que la imagen de referencia, y se **estimaré la señal de error como la diferencia entre las coordenadas de referencia y las coordenadas de la imagen de guiado que se acaba de tomar**. Es importante el orden de los factores para hacer la diferencia, ya que si la señal de error es negativa el telescopio no corregirá bien los desplazamientos.
- La señal de error debe ser transmitida al telescopio en un formato que el sistema pueda entender, lo que implica expresarla en píxeles y en los mismos ejes de referencia del telescopio (ejes del cielo). Los ejes del buscador usualmente están girados un ángulo α con respecto a los ejes del telescopio (ver Figura 15). Por lo tanto, no es posible simplemente transferir la diferencia en píxeles tal como se ha calculado en el sistema de referencia del buscador, sino que se debe transformar al sistema de referencia del telescopio (ejes alineados).

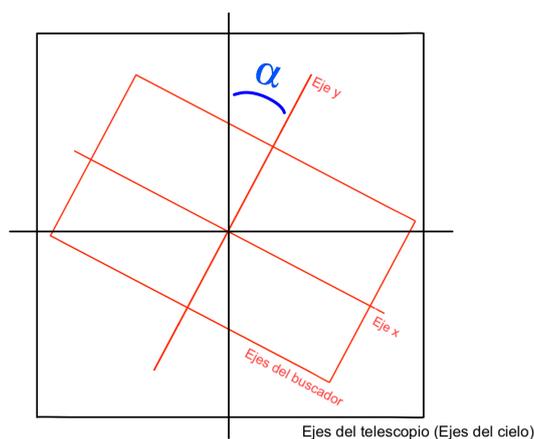


Figura 15: Ejes del buscador girados un ángulo α con respecto al sistema de referencia del telescopio.

Se han abordado dos métodos para resolver el problema de los sistemas de referencia. **El primer método consiste en girar los centroides al sistema de referencia del telescopio** antes de calcular la señal de error. Para ello, es necesario astrometrizar una imagen mediante *astrometry.net*⁶ y así obtener el valor del ángulo α . Este proceso se ha de realizar siempre que se instala la estructura de guiado, ya que el ángulo podría variar con el acople y desacople de esta. Siempre que se ha astrometrizado, el ángulo no ha variado, por lo que la orientación del buscador con respecto a los ejes del telescopio actualmente es de $\alpha = -0.3$ grados al este del norte. De esta forma, se calculan las coordenadas de referencia y las de las imágenes de guiado tal y como se ha expuesto en los pasos anteriores y se giran mediante una función de *python* que rota un punto en el plano xy en sentido antihorario alrededor del origen a través del ángulo dado. Con las coordenadas giradas se calcula la diferencia en píxeles y se transfiere al sistema de control del telescopio. **El segundo**

⁶Astrometrización de imágenes en línea: <https://nova.astrometry.net>

método calcula la señal de error en coordenadas de cielo y después las vuelve a pasar a píxeles para transferir la señal de error al telescopio. Trabajar en coordenadas de cielo para calcular los centroides y la señal de error es equivalente a trabajar en el sistema de referencia del telescopio, por lo que no es necesario girar las coordenadas. Así pues, se estiman las coordenadas de referencia y las de las imágenes de guiado tal y como se ha expuesto en los pasos anteriores. Los píxeles se transforman a coordenadas de cielo mediante una función de *python* y se obtiene la señal de error. La función que transforma píxeles a coordenadas de cielo trabaja con imágenes astrometrizadas, por lo tanto, cada vez que es necesario calcular nuevas coordenadas celestes, se debe astrometrizar. Para ello, el código se conecta con la web de *astrometry.net* y obtiene la imagen astrometrizada correspondiente. Finalmente, la diferencia de coordenadas se transforma de nuevo en píxeles utilizando la escala de placa del buscador ($0.152''/\text{píxel}$) y se transfiere al sistema de control del telescopio. No obstante, durante las pruebas en telescopio se descartó este último método dado que requería astrometrizaciones constantes durante el proceso de guiado y ralentizaba considerablemente el algoritmo. Por lo que para garantizar un software más ágil y optimizar tiempo, se utilizó exclusivamente el método que calculaba la señal de error solo en píxeles.

Antes de iniciar el proceso descrito, **el buscador debe estar bien enfocado para asegurar un funcionamiento correcto del proceso de guiado**. Si las imágenes de guiado no están nítidas y muestran elongaciones, será difícil estimar el centro de la estrella y el sistema puede no funcionar correctamente. El software incluye una función que automatiza el proceso de enfoque. Para enfocar itera a través de diferentes posiciones de enfoque, moviendo el brazo del buscador y tomando imágenes. Para cada imagen se calcula la anchura a media altura (FWHM, *Full Width at Half Maximum*), lo que proporciona una medida de la nitidez de la imagen. Estos valores se utilizan para ajustar una parábola, de manera que el valor del enfoque que corresponda con el punto mínimo de la parábola, será el mejor enfoque (Ver Figura 16).

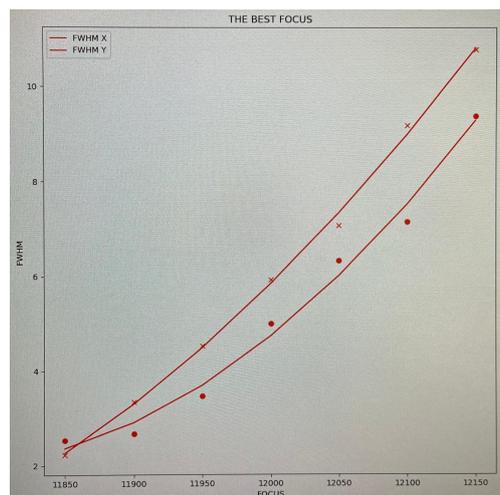


Figura 16: Ajustes de parábolas con valores de FWHM para encontrar el mejor valor de enfoque.

Por último, se ha de mencionar que todas las funciones y características que se han implementado al software interactúan con el usuario a través de la interfaz que se muestra en la Figura 17.

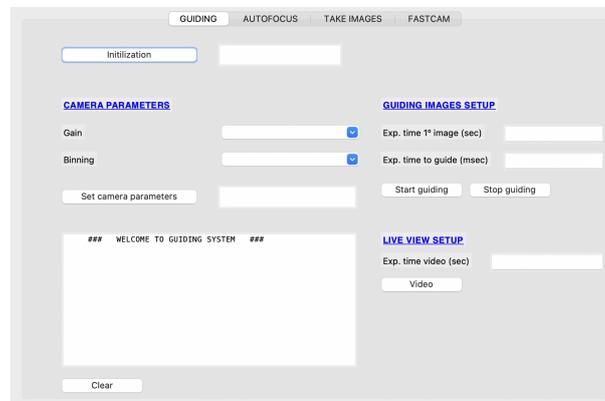


Figura 17: Interfaz diseñada para interactuar con el sistema de auto-guiado en el TCS.

3.1.2 Ajuste de orientación del buscador en el sistema de control del telescopio

El telescopio debe recibir la señal de error en píxeles y en el sistema de referencia del telescopio (ejes alineados). Pero además de esto, **para guiar correctamente es necesario configurar en el sistema de control del telescopio la orientación del buscador**. De esta forma, el telescopio puede identificar un eje para la ascensión recta y otro para la declinación. La orientación del buscador puede modificarse accediendo al archivo *guiado.ag* del sistema de control que se muestra en la Figura 18.

```

Archivo Edición Búsqueda Opciones Ayuda
GUIADO.AG
0.152 = AG_AR_1LINEA = " equivalentes a 1 línea de TV en AR
0.152 = AG_DEC_1LINEA = " equivalentes a 1 línea de TV en DEC
-1 = AG_AR_SENT = Sentido AR (+1=Deste Izquierda/Arriba;-1=inv.)
+1 = AG_DEC_SENT = Sentido DEC (+1=Norte Izquierda/Arriba;-1=inv.)
0 = AG_EJE_AR = Eje de AR ( 0 = Horizontal, 1 = Vertical )

MS-DOS Editor F1=Ayuda Presione ALT para activar menús B 00001:001

```

Figura 18: Archivo *guiado.ag* del sistema control del telescopio TCS. Mediante este archivo es posible modificar la orientación del buscador.

El primer parámetro que hay que añadir en el archivo *guiado.ag* es la escala de placa del buscador ($0.152''/\text{píxel}$). Mediante los parámetros *AG_AR_SENT* y *AG_DEC_SENT*, se indica al telescopio cual es el oeste y el norte del buscador respectivamente. La dirección del oeste indica el sentido de la ascensión recta mientras que la dirección norte indica el sentido de la declinación. Para determinar donde estaba la dirección hacia el oeste del buscador, se detuvo el seguimiento del telescopio para observar el movimiento natural de los objetos hacia el oeste. En este caso, hacia la derecha (Valor -1 para el archivo *guiado.ag*). Para la dirección norte, se dio al telescopio un offset en declinación (hacia el norte), por lo que en la imagen las estrellas se movían hacia el sur. En este caso, el norte quedaba hacia arriba (Valor +1 para el archivo *guiado.ag*). Con el parámetro *AG_EJE_AR* se escoge cuál es el eje de ascensión recta en el buscador, es decir, el eje horizontal (Valor 0 para el archivo *guiado.ag*). Para ilustrar el concepto del ajuste de los sistemas de referencia se ha representado en la Figura 19 el sistema de referencia real y como sería el sistema de referencia modificado para que el telescopio pueda interpretar los resultados.

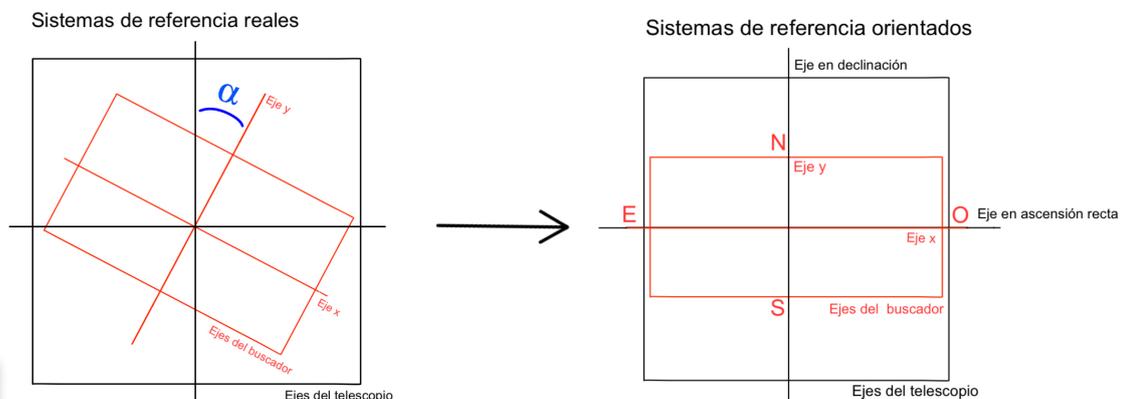


Figura 19: Mediante esta Figura se pretende ilustrar los cambios necesarios que hay que aplicar al sistema de referencia del buscador para que el telescopio interprete las órdenes de manera adecuada.

3.1.3 Criterios de guiado

Como se ha descrito en la Subsección 3.1.1, la segunda función es la que se encarga de realizar el proceso de guiado. Sin embargo, **la señal de error puede perderse por diversas circunstancias durante las observaciones**. Por ejemplo, si hay nubes en el cielo el algoritmo dejará de estimar un centro porque se habrá perdido la estrella guía de la imagen. Por este motivo, la función debe tener un límite a partir del cual se considere que el guiado se ha perdido e interrumpa el proceso.

Para este estudio, se han implementado dos métodos para establecer un criterio de guiado. El primer método se basa en implementar el mismo algoritmo utilizado en el telescopio IAC80. Para ello, en primer lugar se debe obtener la intensidad del píxel máximo de la estrella. Cogiendo como centro el píxel máximo, se hará un cuadrado más pequeño (41×41) con el que se calculará un promedio de la intensidad de la suma de los laterales de los píxeles del cuadrado. La pérdida de la señal de error se establece cuando

la diferencia entre la intensidad del píxel máximo con el valor promedio de los laterales del cuadrado sea menor que 768. Para el IAC80, utilizando una cámara de 8 bits (La intensidad del píxel puede variar entre 0 y 255) la diferencia entre las intensidades debe ser menor que 3. En el TCS, la cámara es de 16 bits (La intensidad de píxel puede variar entre 0 y 65535). Para adaptar la diferencia de intensidad de 3 (en una escala de 8 bits) a una cámara de 16 bits se ha multiplicado por el factor de escala (2^8) obteniendo el valor 768. Solo cuando la diferencia sea menor en cinco imágenes consecutivas se detendrá el proceso de guiado. En la Figura 20 pueden verse las zonas que se comparan durante el proceso.

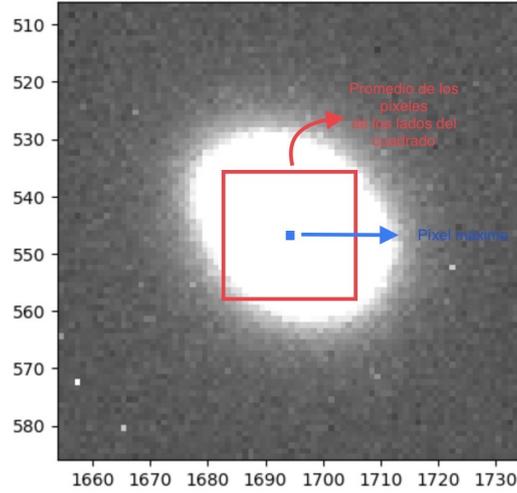


Figura 20: El criterio de guiado calcula la diferencia en intensidad entre el píxel máximo (píxel azul), con el promedio de los lados del cuadrado rojo.

El segundo criterio, adopta el mismo enfoque que el método anterior, con la diferencia de que esta vez el proceso se detiene cuando se alcanza un valor de 40 en S/N. La S/N es estimada como sigue en la Ecuación 3.1.

$$S/N = \frac{g \cdot F_*}{\sqrt{g \cdot F_* + \pi \cdot rad^2 \cdot g \cdot F_b + \pi \cdot rad^2 \cdot R^2}} \quad (3.1)$$

Para la ganancia g se ha utilizado el valor 0.405 ± 0.003 (e-/ADU) y para el ruido de lectura R se ha tomado el valor de 6.28 ADU. Ambos valores se encuentran en el artículo de Alarcon et al. (2023) [16] para la cámara QHYCCD 600 PRO, en el modo 0 (Modo usual de trabajo). El valor de rad se corresponde con el tamaño de apertura en píxeles. Por último, F_* es el flujo de la estrella, mientras que F_b es el flujo del *background* alrededor de la estrella. Ambos valores se han calculado utilizando el paquete de *photutils* de *python*.

3.1.4 Pruebas experimentales

La verificación del funcionamiento del software se ha realizado durante las noches de servicio del TCS con el instrumento CARONTE. Las noches de servicio no son frecuentes, por lo que es muy importante minimizar el número de errores del software para maximizar la eficiencia durante las pruebas. Con este fin, el software se desarrolló

previamente mediante escenarios similares a la situación real. Las primeras pruebas se hicieron simulando una estrella con un láser en el laboratorio del IAC. En la Figura 21a se muestra el láser junto con el buscador, mientras que en la Figura 21b se puede ver la estrella simulada. A través de este primer escenario, se desarrollaron las tareas más básicas como el cálculo de centroides y la creación de funciones de *python* básicas.



(a) Láser simulador de estrella junto a buscador QHYCCD 600 PRO en el laboratorio del IAC.

(b) Imagen del buscador de estrella simulada con láser en el laboratorio del IAC.

Figura 21: Primeras pruebas para desarrollar el software de guiado en el laboratorio del Instituto de Astrofísica de Canarias.

El siguiente escenario para el desarrollo del software fue instalar el buscador a un pequeño telescopio alineado al telescopio IAC80. El montaje utilizado es idéntico al empleado para acoplar un telescopio guía en el IAC80 (Ver Figura 1). La toma de imágenes se realiza mediante un PC independiente con posibilidad de conexión remota, por lo que durante mis noches como operadora en el observatorio del Teide fue posible tomar imágenes sin interrupciones ni intervención en los datos recogidos. Con esta configuración, se prepara el software para tratar con imágenes de estrellas reales y realizar las primeras simulaciones de guiado siempre y cuando la observación se mantenga en el mismo objeto durante un periodo prolongado. Además, es posible explorar más a fondo las funciones y características específicas de la cámara (Toma de imágenes, recortes del detector, etc). Las pruebas en cielo del TCS se iniciaron una vez que se terminó de desarrollar el software por completo y cuando las pruebas en el montaje del Telescopio IAC80 no mostraron ningún error.

3.1.5 Funciones complementarias del sistema de auto-guiado fuera de eje: Centralización del apuntado para FastCam

La estructura del guiado fuera de eje fue específicamente diseñada para el sistema de auto-guiado del TCS, pero una vez construida adquirió una segunda funcionalidad: **la centralización del apuntado para FastCam**. FastCam es un instrumento diseñado para obtener imágenes de muy alta resolución espacial en el visible. Tiene un campo de visión de 35.8" x 35.8", mientras que el campo de visión del buscador es de 6' x 4'. Que el campo del instrumento sea tan reducido implica que cuando se apunta al objeto de interés, este puede quedar fuera del campo de visión del instrumento, pero dentro del campo del buscador. Como se conoce la posición de los píxeles del buscador que equivalen al

centro de FastCam y los píxeles de la posición inicial del objeto, se manda un *offset* al telescopio que centraliza el apuntado para el resto de la observación. Este procedimiento para encontrar la posición X e Y del buscador con el centro de FastCam debe hacerse cada vez que se instala Fastcam en el TCS. En la Figura 22 se muestra un esquema de la centralización del apuntado.

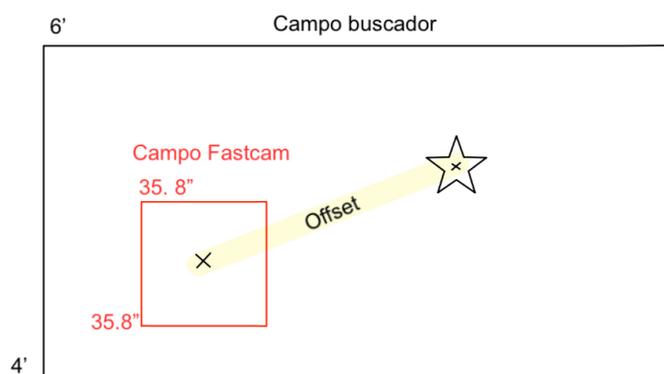


Figura 22: Esquema de la centralización del apuntado para FastCam utilizando el buscador del sistema de auto-guiado fuera de eje del telescopio Carlos Sánchez.

El elemento óptico utilizado para esta función es un **divisor de haz**. Inicialmente se intento usar un dicroico, pero presentaba reflejos indeseados en la imagen del buscador debido a reflexiones internas dentro del elemento óptico. El divisor de haz utilizado deja pasar un 73 % de la luz visible para el instrumento mientras que el 27 % restante lo usa el buscador. Para reutilizar los recursos, todas las pruebas de guiado de este trabajo se han hecho con este mismo divisor de haz. Aunque lo ideal sería emplear un dicroico, el divisor de haz utilizado es adecuado para satisfacer las funciones requeridas en la situación actual. Para el caso de FastCam, dado el campo reducido del instrumento, no supone una diferencia usar solo el 73 % de la luz. Por otro lado, para las pruebas de guiado la perdida de luz tampoco supone un problema ya que, el divisor de haz se considera óptimo para verificar el guiado independientemente de la cámara científica que se utilice. No obstante, se han solicitado nuevos dicroicos, por lo que en el futuro se sustituirá el divisor de haz por este nuevo componente para no perder flujo en las imágenes de ciencia.

3.2 Modificaciones en el sistema de auto-guiado del IAC80

Para la automatización del sistema de guiado del IAC80 se ha encontrado una **relación lineal entre el movimiento del carro X-Y y las coordenadas de cielo de la estrella guía**. En las siguientes subsecciones se describe el procedimiento.

3.2.1 Pruebas experimentales para encontrar la relación lineal entre movimiento del carro X-Y y coordenadas de cielo de la estrella guía

La metodología aplicada para obtener la relación lineal entre el movimiento del carro X-Y y las coordenadas de cielo de la estrella guía se divide en los siguientes pasos.

- Se apunta a una estrella de tipo FK⁷. Por lo que queda en el centro del detector y además se conocen sus coordenadas de cielo.
- Se pretende determinar que posición del carro X-Y se corresponde con las coordenadas de cielo apuntadas. Para ello, se localiza la estrella guía utilizando el *joystick*. En este caso, el espejo tiene que entrar dentro del campo de visión del detector (cuadrado verde), ya que la estrella está en el centro. Las coordenadas del carro se registran utilizando el software de control del sistema de auto-guiado. En la Figura 23 se muestran los valores de su posición para la ubicación del espejo (cuadrado azul). Además, se ha dibujado sobre las áreas de búsqueda los ejes de coordenadas del carro.

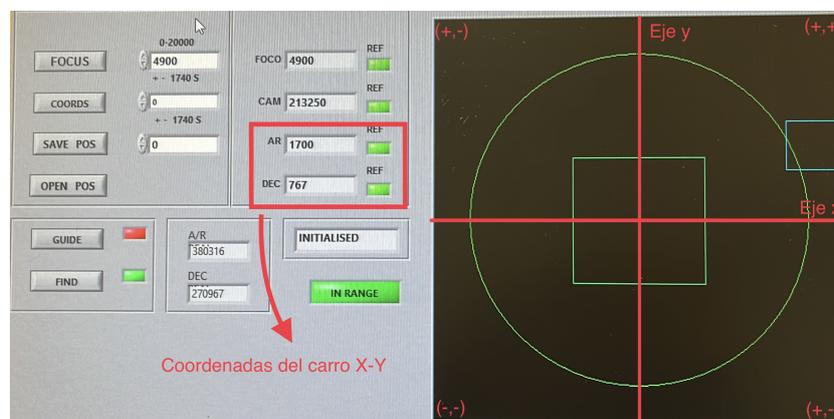


Figura 23: Coordenadas del carro X-Y en el software de control del sistema de auto-guiado del IAC80. Sobre el área de búsqueda se han dibujado los ejes de coordenadas correspondientes al carro X-Y.

- Para encontrar la relación en todas las direcciones, se realizaron una serie de *offset* en declinación y ascensión recta tanto positiva como negativa. Para el detector y el buscador, es equivalente a mover la estrella hacia la derecha, izquierda, arriba y abajo. Para cada *offset*, se buscaba la estrella con el *joystick* y se registraban las coordenadas del carro X-Y como en el paso anterior. Este procedimiento se aplicó en cada dirección hasta que la estrella quedaba fuera del campo de visión del buscador y no se podía continuar registrando medidas.

Las pruebas descritas fueron realizadas durante algunas noches de servicio del IAC80 como operadora de turno y las relaciones lineales fueron calculadas por David Nespral y Rosa Clavero (Astrónomos de soporte). En la Ecuación 3.2 se puede ver la relación lineal encontrada entre la ascensión recta y la posición en el carro del eje X.

$$RA(deg) = 0.99x + 67.47 \quad (3.2)$$

⁷Estrellas brillantes y fáciles de identificar

Mientras que en la Ecuación 3.3 se presenta la relación lineal entre la declinación y la posición en el carro del eje Y.

$$DEC(deg) = 1.07y - 2.15 \quad (3.3)$$

3.2.2 Desarrollo del software de automatización

Utilizando las relaciones encontradas, se realizó un *script* de *python* que **automatiza la búsqueda y visualización de estrellas guías dado un determinado campo estelar**. El programa recibe como argumento las coordenadas del objeto científico y lleva a cabo una consulta de posibles estrellas guías en la base de datos de Gaia⁸ utilizando la biblioteca *astroquery* de *python*. Las estrellas de la base de datos de Gaia se buscan dentro del campo de visión del buscador, por lo que se limita a buscar entre un radio total de 30' y un radio interior de 16'. Además, solo se seleccionan aquellas estrellas cuya magnitud aparente en la banda G sea menor que 10, ya que es la magnitud límite del buscador. Las coordenadas de cielo de las estrellas que cumplen las condiciones descritas se transforman a coordenadas para el carro X-Y utilizando las Ecuaciones 3.2 y 3.3 y se muestran en una lista junto con sus coordenadas de cielo y su magnitud G tal y como se presenta en la Figura 24.

```
#####
Introduce las coordenadas del centro de apuntado de Camelot2 en J2000
Example: 20 54 54.12 +25 12 01.25

#####

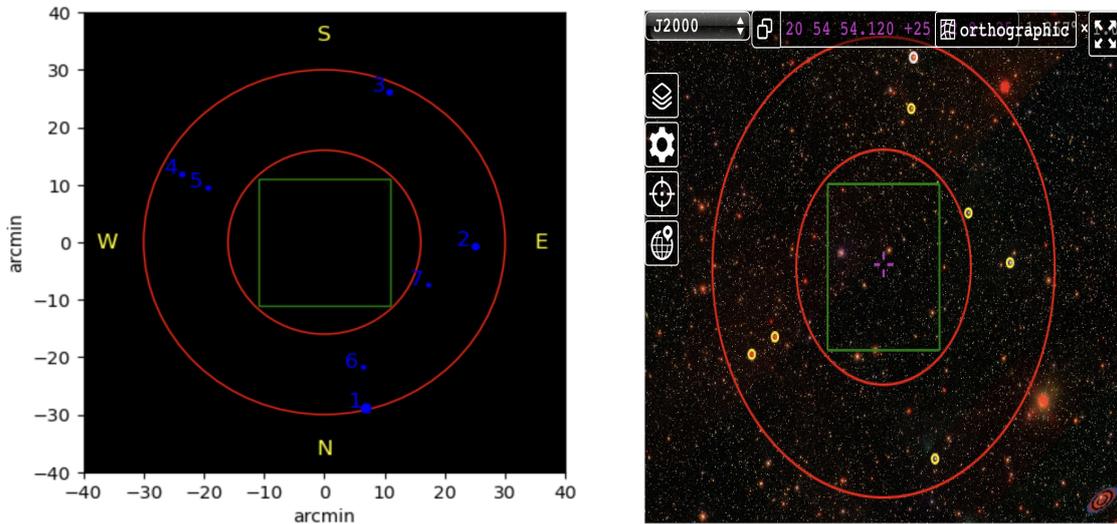
20 54 54.12 +25 12 01.25
#####
RA(deg.)      DEC(deg.)      X              Y              Gmag
#####
1  313.63043629719  25.64639582299  407.85927422331946  -1722.0509351131511  8.392305
2  313.32510995284  25.2092704816  1501.1214325856934  -36.56028179080962  8.872301
3  313.56314828407  24.79230942859  648.7930810066597  1571.1798584011096  9.206507
4  314.14194938283  25.0142268234  -1423.6823217956562  715.4992118101181  9.517696
5  314.06876749103  25.05167060823  -1161.6446874321741  571.1215164898414  9.561336
6  313.63755538637  25.53761254507  382.3684151914484  -1302.598707546365  9.706558
7  313.4567345311  25.31536648022  1029.821876602793  -445.6507579006418  9.819681
#####
```

Figura 24: Ventana que muestra al usuario el *script* diseñado para la automatización de la selección de estrellas guías en el telescopio IAC80. Se puede ver el listado de posibles estrellas guías para las coordenadas que el usuario ha introducido como argumento. Las estrellas se muestran numeradas, con sus coordenadas en los distintos sistemas de referencia y su respectiva magnitud en la banda G.

De esta forma, **las coordenadas para el carro X-Y de la estrella más brillante serán introducidas en el software de control del sistema de auto-guiado y aparecerán directamente en el campo de visión del buscador sin necesidad de utilizar el joystick**. Por

⁸Base de datos astronómicos de la ESA: <https://gea.esac.esa.int/archive/>

otro lado, con el objetivo de visualizar e ilustrar las estrellas guías, se han señalado en diferentes gráficos dentro de la zona de búsqueda del buscador tal y como se puede ver en la Figura 25. Ambas Figuras replican la pantalla de visualización de la posición del espejo de la Figura 9b.



(a) Estrellas guías numeradas y señaladas dentro de la zona de búsqueda del buscador.

(b) Estrellas guías señalados en amarillo y blanco (la más brillante) dentro del entorno de Aladin.

Figura 25: Ventanas que muestra al usuario el *script* diseñado para la automatización de la selección de estrellas guías en el telescopio IAC80.

A través de la Figura 25a se puede identificar fácilmente la posición de cada una de las estrellas de la lista, mientras que la Figura 25b es una visualización interactiva de Aladin⁹ que se ha implementado mediante la biblioteca *ipyaladin* de *python*. Esta visualización permite ver el campo real que se está observando y sus respectivas estrellas guías. La estrella seleccionada en blanco, es la estrella más brillante (La número 1). Se puede observar que el campo de Aladin esta invertido con respecto al del buscador, es por ello que en la Figura 25a se han añadido los puntos cardinales para entender la orientación de una figura frente a la otra.

4 Resultados y discusión

4.1 Evaluación del nuevo sistema de auto-guiado del TCS

Las pruebas de guiado se realizaron con el instrumento CARONTE durante las noches de servicio del 12 de diciembre de 2023, 8 y 9 de enero de 2024 y 15 de marzo de 2024. En la Figura 26 se muestran las imágenes de guiado resultantes para los objetos M108, M109, M105 y la estrella Hamal. Todas las imágenes se tomaron con un tiempo de exposición de 15 minutos con el objetivo de comprobar que el software es capaz de guiar durante periodos de tiempo largos e ininterrumpidos.

⁹Aladin Sky Atlas: <https://aladin.cds.unistra.fr>

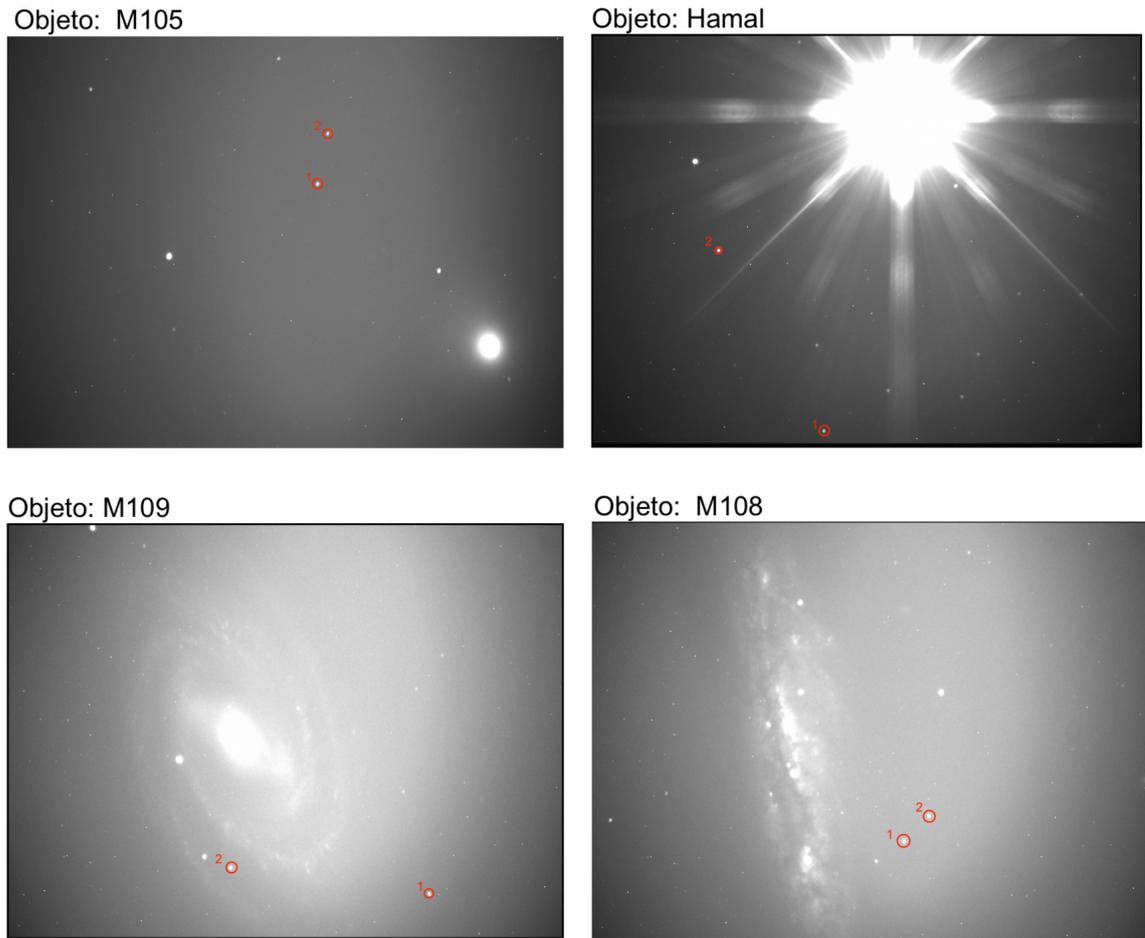


Figura 26: Imágenes de M105, Hamal, M109 y M108 con tiempos de exposición de 15 minutos. Fueron tomadas con el instrumento CARONTE en el TCS, utilizando el software de auto-guiado diseñado en este trabajo. Para las estrellas señaladas en rojo se ha estimado la FWHM.

Para evaluar con más profundidad los resultados, en la Tabla 1 se ha comparado la FWHM de las estrellas marcadas en rojo de la Figura 26, con el *seeing* de la noche según los valores medidos con SPECULOOS [17]. Si el telescopio corrige con suficiente precisión, el *seeing* de la noche debería ser similar a la FWHM de las estrellas. La FWHM fue calculada en píxeles mediante IRAF¹⁰, para compararla con el *seeing* se ha transformado a arcosegundos multiplicando por la escala de placa del instrumento CARONTE (0.153"/píxel). Los resultados de la Tabla 1 ponen en evidencia la similitud entre la FWHM de las estrellas seleccionadas y el *seeing* de la noche, mientras que la Figura 26 demuestra que las imágenes están nítidas y bien definidas, sin signos de borrosidad u otros problemas. En consecuencia, se concluye que **el sistema de auto-guiado ha logrado corregir adecuadamente el movimiento aparente de las estrellas a lo largo del tiempo, a pesar de cualquier desalineación o vibración del telescopio.**

¹⁰Image Reduction and Analysis Facility, o Utilidad de Análisis y Reducción de Datos (<https://iraf.net/>).

Objeto	Estrella	FWHM ["]	Seeing ["]
M105	1	1.50	1.40
M105	2	1.61	1.40
Hamal	1	1.60	1.50
Hamal	2	1.58	1.50
M109	1	1.93	1.40
M109	2	1.73	1.40
M108	1	1.65	1.40
M108	2	1.68	1.40

Tabla 1: Estimación de la FWHM para las estrellas seleccionadas en la Figura 26. Los valores de la FWHM se han comparado con el *seeing* de la noche.

Por último, se ha de mencionar que se comprobó que los criterios de guiado propuestos interrumpen correctamente el proceso de guiado en el caso de perder la señal de error. Durante las noches de servicio no hubo nubes, pero se simuló la pérdida de la señal de error introduciendo manualmente un elemento óptico al camino óptico.

4.2 Automatización del sistema de auto-guiado del IAC80

El programa desarrollado en la Subsección 3.2, se probó durante observaciones reales en el IAC80. Durante las pruebas en telescopio, se comprobó que dado un objeto científico, si se introducen las coordenadas para el carro X-Y que devuelve la lista de estrellas guías (Ver Figura 24) en el software de control del sistema de auto-guiado, el espejo se mueve automáticamente hasta reflejar la estrella en el buscador tal y como se puede observar en la Figura 27.

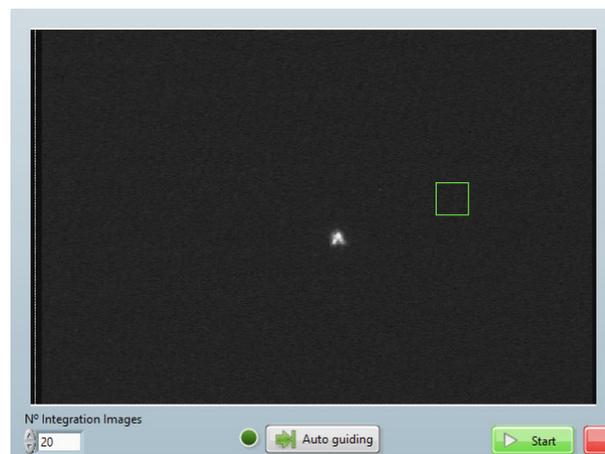


Figura 27: Estrella guía dentro del campo de visión del buscador.

Con la estrella en el campo de visión, se selecciona y se pulsa el botón de *autoguiding* comenzando el proceso de guiado. Con el funcionamiento de este programa queda resuelta la falta de automatización del sistema de auto-guiado del IAC80. Por lo que, de ahora en adelante se podrá guiar de manera remota en el telescopio.

Actualmente, el *script* es utilizado diariamente tanto por los operadores como por las universidades (De manera remota y presencial). Asimismo, la herramienta de visualización de Aladin (Ver Figura 25b) ha resultado de gran utilidad para los observadores en otros ámbitos, ya que además de poder identificar de manera muy ilustrativa las estrellas de guiado, se trata de un recurso práctico y rápido para comparar la imagen del detector con el campo de Aladin. El cuadrado verde que muestra la visualización de Aladin tiene las dimensiones del campo de visión de CAMELOT2, por lo que igualmente puede servir para tener una idea de si tu objeto de estudio va a entrar en el campo o no.

5 Conclusiones

Como resumen del trabajo descrito, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Se ha evaluado la viabilidad de un sistema de auto-guiado fuera de eje para el TCS. Los resultados demuestran la estabilidad del sistema, evidenciando que es posible obtener imágenes nítidas de larga exposición. Además, se ha estimado la FWHM de algunas de las estrellas de las imágenes obtenidas, concluyendo que los valores determinados son similares al *seeing* de la noche, lo que implica que el sistema de auto-guiado no introduce distorsiones adicionales en las imágenes astronómicas y realiza el seguimiento del objeto con suficiente precisión. Por otro lado, la estructura mecánica del sistema ha resultado de gran ayuda para la utilización del instrumento FastCam, ya que agiliza y facilita considerablemente la centralización del apuntado del instrumento.
- El nuevo sistema de auto-guiado para el TCS podrá adaptarse a una gama de instrumentos más amplia, dado que ya no será necesario que contengan su propio sistema de auto-guiado para poder operar en el telescopio. Esto supone una ventaja significativa para futuras observaciones y proyectos de investigación. Asimismo, se proyecta que en el futuro se construya una caja de adquisición que lleve acoplado de forma fija el sistema de auto-guiado, junto con el resto de instrumentos que se estén ofreciendo en el TCS. De manera que, mediante un espejo, la luz se reflejará hacia el instrumento de uso con la posibilidad de utilizar el sistema de auto-guiado diseñado evitando instalaciones y desinstalaciones continuas.
- Se ha demostrado que los telescopios guía no son sistemas de auto-guiado adecuados para el TCS y el IAC80. Probablemente, la antigüedad de las estructuras incrementan los problemas de flexiones, siendo muy dependientes de la altitud y la dirección del telescopio. Por lo que, los sistemas de auto-guiado fuera de eje son más adecuados en los casos de estudio.
- La automatización del sistema de auto-guiado del IAC80 ha facilitado las observaciones astronómicas, permitiendo la selección y seguimiento automático de estrellas guías. Esto incrementa la eficiencia operativa y abre la posibilidad de realizar observaciones de manera remota para investigadores y universidades.
- Los avances que se han desarrollado en este estudio para los sistemas de auto-guiado mejoran la operatividad y accesibilidad de los telescopios del Observatorio del Teide. Para ambos sistemas de auto-guiado se ha priorizado la sostenibilidad

y la reducción de costes. Se ha procurado que las aportaciones realizadas puedan ser utilizadas en otros ámbitos o contextos. Es decir, se ha buscado que nuestras propuestas de sistema sean versátiles. Se concluye así, que es posible realizar una modernización significativa de las instalaciones sin necesidad de grandes inversiones adicionales.

Referencias

- [1] C R Kitchin,
Astrophysical Techniques,
University of Hertfordshire Observatory, 2003.
- [2] J. McCormac, D. Pollacco, I. Skillen, F.Faedi, I. Todd, C.A. Watson
DONUTS: A science frame autoguiding algorithm with sub-pixel precision, capable of guiding on defocused stars,
Astronomical Society of the Pacific, 125 (2013) 548-556
- [3] R.A. Laing
Algorithms for Guide-Star Acquisition and Control of Mount and Optical Surfaces,
Royal Greenwich Observatory
- [4] Jelley, J. V.
Autoguiders and acquisition systems for optical telescopes,
Royal Astronomical Society, 21 (1980) 14-31
- [5] Differential Flexure,
<http://astronomy.mdodd.com/flexure.html>
- [6] Eunbin Kim, Won-kee Park, Hyeonju Jeong, Jinyoung Kim, John Kuehne
Auto-guiding system for CQUEAN (camera for quasars in early universe),
Journal of The Korean Astronomical Society, 44 (2011) 115-123
- [7] Observatorio del Teide,
<https://www.iac.es/es/observatorios-de-canarias/observatorio-del-teide>
- [8] Observatorios astronómicos en ESPAÑA,
<http://www.telescopios.org/observatorio-del-Teide.htm>
- [9] Telescopio Carlos Sánchez,
<https://research.iac.es/OOCC/iac-managed-telescopes/telescopio-carlos-sanchez/>
- [10] Telescopio IAC80,
<https://www.iac.es/es/observatorios-de-canarias/telescopios-y-experimentos/iac80-telescope>
- [11] FastCam,
<https://research.iac.es/OOCC/iac-managed-telescopes/telescopio-carlos-sanchez/fastcam/>

- [12] MUSCAT2,
<https://research.iac.es/OOCC/iac-managed-telescopes/telescopio-carlos-sanchez/muscat2/>
- [13] CARONTE,
<https://research.iac.es/OOCC/caronte/>
- [14] CAMELOT2,
<https://research.iac.es/OOCC/iac-managed-telescopes/iac80/camelot2-2/>
- [15] QHYCCD,
<https://www.qhyccd.com/astronomical-camera-qhy600/>
- [16] Miguel R. Alarcon, Javier Licandro, Miquel Serra-Ricart, Vicens Gaitan, Rebeca de Sousa
Scientific CMOS sensors in Astronomy: IMX455 and IMX411,
Astronomical Society of the Pacific, 135 (2023) 1-17
- [17] *Seeing* SPECULOOS,
<https://cww.ot-admin.net/v2/d/cww`ot/common-weather-website-of-teide-observatory?orgId=1refresh=1mfrom=1716499341932to=1716585741932viewPanel=85>