

Identificación y corrección de errores de controlador de rotores para el seguimiento de satélites

Luis Ángel Córdova Hernández, Martha Galaz-Larios, Luis Manuel Rodríguez

IPN - ESIME Zacatenco

lcordovahl400@alumno.ipn.mx, mgalaz@ipn.mx, lrodriguezml@ipn.mx

URL ORCID: 0000-0002-1693-1796, 0009-0001-3973-025X

Abstract- This paper will discuss the identification and correction of malfunctions for the proper use of a rotor controller in a satellite earth station, in order to automate the process of tracking LEO satellites to improve the links during the passing of these. This will be achieved by following a methodology based on different operational tests that will be performed on the equipment to be used.

The expected result is the full restoration of the rotors functionality and the correct technical documentation of the corrective solutions.

Defects were identified in different sectors with which the equipment works, and an appropriate solution was implemented for each error in order for the equipment to work properly in satellite tracking.

Resumen— En el presente artículo se abordarán temas acerca de la identificación y corrección de fallas de un controlador de rotores para el uso apropiado en una estación terrena satelital, con el fin de automatizar el proceso de seguimiento de satélites de órbita baja controlado por computadora para mejorar los enlaces durante el pase de éstos. Esto se logrará siguiendo una metodología basada en distintas pruebas de funcionamiento que se realizarán en los equipos a utilizar.

El resultado esperado es la restauración total de la funcionalidad de los rotores, su manejo a través de la computadora y la correcta documentación técnica sobre las soluciones correctivas realizadas.

Se lograron identificar fallas en distintos elementos con los que trabaja el equipo y se implementó la solución pertinente en cada falla para que el equipo trabaje adecuadamente en el seguimiento satelital.

Palabras Clave — Seguimiento Satelital, estación terrena satelital, control de rotores

I. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se ha popularizado el uso de las comunicaciones satelitales creando misiones con la intención de fomentar el uso espacial.

Proyectos como los satélites NOAA (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de EE.UU.) son satélites de

órbita baja - LEO (Low Earth Orbit) diseñados para recopilar datos meteorológicos y ambientales, permitiendo descargar datos en formato de audio para conversión en imágenes meteorológicas para su análisis (Figura 1).

La popularización del uso de estas imágenes para la predicción de factores climáticos nos ha llevado al desarrollo y evolución de estaciones terrenas satelitales que sean capaces de recibir y procesar dichas imágenes, el presente trabajo indagará acerca de estas estaciones y documentará la rehabilitación de ésta, así como su viabilidad sobre el uso de diferentes dispositivos que pertenezcan al diseño de la estación terrena satelital implementada.

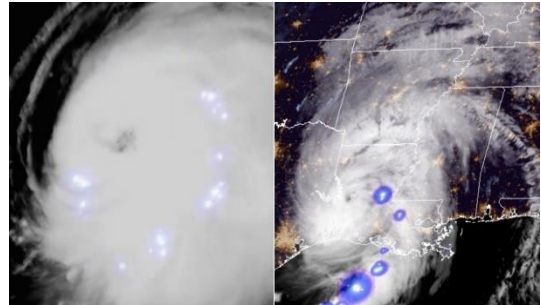


Figura 1. Imagen descargada de un satélite NOAA

Una estación terrena satelital es un conjunto de instalaciones y equipos ubicados en la superficie terrestre diseñados para comunicarse con satélites en órbita. Su función principal es transmitir, recibir y procesar señales para intercambiar datos, voz, video u otra información con satélites artificiales. Autores como Rodolfo Neri Vela la definen como *una serie de equipos de comunicaciones y de cómputo interconectados entre sí, de los cuales el más representativo y conocido es su antena o reflector parabólico* [1].

Una estación terrena se compone de los siguientes elementos.

- **Antenas:** la elección de las antenas apunta principalmente al tipo de frecuencias a utilizar en el enlace, para el caso de enlace con satélites educativos se emplean las bandas de radioaficionados VHF, UHF para las cuales el tipo de antenas más recomendados son las yaguis y las tipo hélices, si la ganancia de la antena no es la adecuada

para realizar un enlace de comunicaciones optimo, se pueden agrupar varios elementos radiantes conformando un arreglo.

- Mecanismo de servomotor: compuesto por un sistema de rotor que apunta las antenas mecánicamente a la dirección del satélite, las coordenadas utilizadas para el apuntamiento son entregadas por un software a través del puerto de control.
- Transceptor: se encarga de trasladar la información modulada a una portadora en la frecuencia del radioenlace tierra-satélite.
- Modem: equipo el cual tiene como función modular o demodular las tramas de información recibidas del satélite o transmitidas desde la estación en tierra. [2]

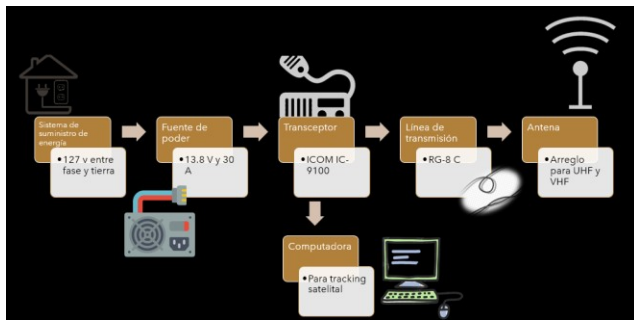


Figura 2 Esquema de una estación terrena satelital

En México, diversas instituciones educativas han establecido estaciones terrenas satelitales más sofisticadas como parte de iniciativas académicas y de investigación tecnológica. Algunos ejemplos destacados son:

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM): En colaboración con la Agencia Espacial Mexicana (AEM) y empresas tecnológicas como Orolia, se desarrolló un programa para formar especialistas en tecnologías GNSS (Sistemas Globales de Navegación por Satélite). [3]

Universidad Autónoma de Baja California (UABC): La UABC opera una estación terrena satelital que realiza seguimiento de satélites de órbita baja (LEO), impulsando la educación en telecomunicaciones y ciencias del espacio. [4]

La sofisticación de las estaciones terrenas satelitales se ha visto reflejada en estos proyectos debido a la necesidad de mejorar los enlaces y el aprovechamiento óptimo del tiempo de pase satelital, esto ha sido con ayuda del uso de mejores acopladores, amplificadores de bajo ruido, e implementación de software que automatice el seguimiento y el efecto Doppler con el fin de disminuir errores humanos de operación y mejorar la precisión.

La automatización del seguimiento de satélites se vuelve de alta relevancia a la hora de mejorar una estación terrena satelital, desde las ventajas que ofrece para los enlaces satelitales (disminución de errores humanos, mejora en tiempo de enlaces y precisión de dirección) hasta las que nos ofrece para la operación de la estación (operación y monitoreo desde un solo lugar).

II. METODOLOGÍA/DESARROLLO

A. Identificación de equipo

La rehabilitación del equipo requiere un análisis detallado del hardware disponible para determinar su estado operativo y su compatibilidad con los requerimientos del sistema. Este proceso inicia con la identificación y clasificación de los subsistemas principales, que incluyen el sistema de antenas, el mecanismo de apuntamiento, transceptor, los controladores de seguimiento, la infraestructura de cableado y conectividad a la computadora.

Cada componente debe ser evaluado en términos de su funcionalidad, degradación por envejecimiento, precisión operativa y conformidad.

Esta sección documenta el estado actual de cada subsistema y establece los criterios para su reparación, ajuste o reemplazo, asegurando que la estación cumpla con los requerimientos técnicos para la recepción y transmisión de señales satelitales de órbita baja con un desempeño óptimo.

Hardware

- Rotores y controlador de rotadores

El sistema cuenta con dos rotadores y un controlador YAESU G-5500 que proporciona un control de azimut de 450° y de elevación de 180° de conjuntos de antenas de satélite unidireccionales de tamaño mediano y grande bajo control remoto desde la posición de operación de la estación.



Figura 3 Controlador de rotadores YAESU G-5500

Las dos unidades de rotadores están hechas de aluminio fundido recubierto de resina de melamina resistente a la

intemperie, que brinda un funcionamiento sin mantenimiento en todas las condiciones climáticas. Los rotores pueden montarse juntos en un mástil (configuración actual), o de forma independiente con el rotor de acimut dentro de una torre y el rotador de elevación en él mástil.

- Antenas

Para la comunicación con el satélite se tiene una antena de polarización circular, diseñada para trabajar en la banda de aficionados de dos metros. La adaptación y ganancia óptimas se encuentran entre 144 y 147 MHz para la banda de satélite. Las técnicas de diseño por ordenador ayudan a mantener bajos los lóbulos laterales espurios para una óptima relación señal/ruido.

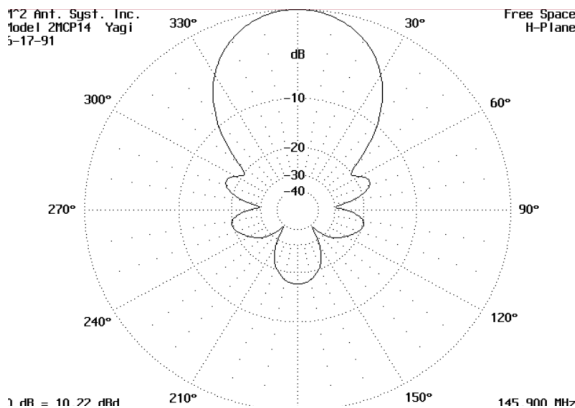


Figura 4 Patrón de radiación de antena

Esta antena fue fabricada de forma CNC (Control Numérico Computarizado), cuenta con una junta tipo anillo y un sellado con gel de silicón, lo que nos ofrece un mejor rendimiento para exteriores. Ensamblada con una configuración tipo Yagi, la antena unidireccional de banda angosta opera con una ganancia de 12.34 dBi



Figura 5 Controlador de rotores YAESU G-5500

- Computadora

Desde la PC se operará la estación, esto incluye el sistema de posicionamiento de los rotores, siendo este el núcleo de la

operación y por lo tanto de la automatización del seguimiento, por lo que se tiene que tener un equipo que soporte los softwares a utilizar, los software no demandan muchos recursos por lo que un equipo rudimentario funcionará, pero se tiene que contemplar las futuras escalas e implementaciones al proyecto, ya que si se desea agregar dispositivos como SDR o transformar a una estación móvil se tendrá que reemplazar el equipo.



Figura 6 PC para uso de aplicaciones de seguimiento satelital y decodificación de señales

- Extensores DB9 a RJ45

Al implementar rotores a una estación hay que tener en cuenta que esto se hace con la finalidad que las antenas estén en un lugar con mejor recepción y la sala de control de la estación se pueda instalar en un lugar cerrado que proteja la integridad del equipo de operación y que permita al operador trabajar de manera más óptima (objetivos que en ocasiones no son compatibles en el mismo espacio), así que para lograr este cometido se utilizó un cable UTP con conectores RJ45 para extender la comunicación del techo del edificio hasta el laboratorio de las instalaciones del PCIT y para esto fue necesaria la colocación de módulos extensores para evitar la pérdida de comunicación por la distancia.

- Dispositivo Arduino con interfaz MAX232

Este dispositivo esta implementado para la codificación de los datos que ingresen al controlador de rotores y devolverá datos a la PC que informen acerca de azimut y elevación.

Software

El equipo de cómputo a utilizar cuenta con el sistema operativo Linux Ubuntu 13.01 lo cual nos permitirá tener más acceso de uso de puertos virtuales e interfaces debido a su facilidad de habilitación por medio de comandos en su terminal.

- G-Predict

Gpredict es un software de código abierto gratuito para el rastreo en tiempo real de satélites. Es muy utilizado por

radioaficionados para la comunicación satelital. Está disponible en múltiples plataformas, incluyendo Windows, Linux y macOS. GPredict aplica el uso de *TLE* (Two-Line Elements) que es un formato estándar que describe la órbita de los satélites el cual se actualiza de distintas fuentes de monitoreo satelital como del AMSAT. [5]

- Seguimiento en tiempo real de múltiples satélites en diferentes vistas (mapa, lista, paneles, etc.).
- Predicción de pases con tiempos de visibilidad y elevación.
- Compatibilidad con radios y rotores, permitiendo el control automático mediante protocolos como Yaesu GS-232A/B.
- Descarga automática de TLEs (Two-Line Elements) de fuentes como Celestrak, AMSAT y Space-Track.
- Interfaz modular y personalizable para adaptarse a distintos usos.

- HAMLIB

Hamlib (Ham Radio Control Libraries) es una librería de código abierto diseñada para facilitar la comunicación entre computadoras y equipos de radioaficionados. Se utiliza principalmente para el control de transeptores y rotores de antena mediante software, como Gpredict, WSJT-X, fldigi, SDR++, entre otros. Esta librería también nos ofrece un modo de alto detalle de información transmitida entre equipos conocido como modo de *alta verbosidad*.

B. Diagnóstico y reparación

El controlador presentaba fallos en tres áreas principales: un conector RJ45 defectuoso, módulos extensores de conexión DB9 a RJ45 en mal estado y comandos en la memoria del Arduino que bloqueaban los puertos de uso.

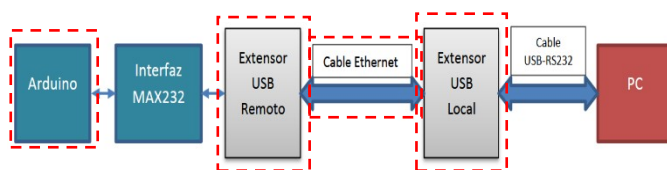


Figura 7 Errores identificados en la estación

La identificación de los errores mencionados fue gracias a diferentes procesos:

- **Reemplazo del conector RJ45:**

Durante la inspección física del equipo, se realizó pruebas de continuidad en los pines de los conectores RJ45 utilizando un probador de cables de red para la inspección de los 7 pines, y un multímetro para la continuidad del cable detectado como defectuoso. Se identificó un falso contacto que impedía la comunicación estable entre los módulos. Se sustituyó por un nuevo conector y se soldaron correctamente las conexiones.

- **Optimización del código en Arduino:**

El proceso de detección para este error consistió en la utilización de la librería Hamlib en su modo de alto detalle, que nos provee de la información de los bytes transmitidos y leídos por parte del sistema de rotores, se observó que la información no se transmitía por los puertos virtuales habilitados para este propósito, utilizando el comando:

```
rotctl -m 601 -vvvv -r /dev/ttyUSB0
```

El cual designa el puerto virtual para el puerto físico USB 0. Debido a la falta de transmisión de este puerto, se consultó la lista de puertos habilitados en la PC y se halló que este puerto estaba habilitado por la misma librería Hamlib, se rastreó el uso del puerto a través del directorio de archivos, en dónde se encontró que el uso del puerto estaba destinado para recibir señales del radio (comandos con los cuales no se habían realizado pruebas), por lo que se concluyó que la memoria del microcontrolador del arduino cada vez que se activaba, enviaba instrucciones alojadas en su memoria que designaban al puerto para el radio debido a sus usos anteriores.

Se revisó el código almacenado en la memoria del microcontrolador dónde se guardaban instrucciones y comandos que bloqueaban los puertos virtuales de comunicación, se reiniciaron los puertos con la eliminación de esta memoria, lo que permitió una operación fluida de la transmisión de los datos de la PC al microcontrolador Arduino del control externo de los rotores.

- **Sustitución de módulos extensores DB9 a RJ45:**

Continuando con el diagnóstico utilizando la librería Hamlib en su modo de alto detalle, se percató que había una transmisión de datos exitosa, pero no una lectura favorable de éstos, debido a que de los paquetes enviados se leían parcialmente, fluctuando entre los 4 y 8 bytes leídos de 11 bytes del paquete que se transmiten desde la PC, teniendo una lectura incompleta de información. Recopilando los análisis y diagnósticos anteriores se descartaron errores de hardware del cable UTP, por lo que se comenzó con un proceso de diagnóstico de los módulos extensores DB9 (RS-232) a RJ45 (Ethernet).

Antes de iniciar con el proceso, se realizó una verificación de la falla saltando los extensores y conectando una PC directamente al Arduino, en donde se tuvieron pruebas exitosas de recepción de paquetes y funcionamiento de los rotores, indicando que el error se encontraba en los módulos extensores.

Se contaba con solo un reemplazo de estos módulos extensores, se realizó pruebas con este módulo para identificar si solo uno de los módulos era defectuoso y se halló que ambos módulos producían errores.

Los módulos defectuosos fueron reemplazados, asegurando una comunicación confiable entre los diferentes componentes del sistema.

C. Pruebas de Funcionamiento

Para validar el correcto funcionamiento del controlador, se realizaron las siguientes pruebas:

1. **Prueba de comunicación con Hamlib:** Se utilizó este software para enviar comandos al controlador y verificar la respuesta de los rotors. Se observó que, tras las correcciones, los paquetes tenían una transmisión completa de bytes así como una lectura íntegra de los mismos, así que los rotors respondieron correctamente a las instrucciones tanto en elevación como en azimut.
2. **Verificación de voltajes:** Se midieron los valores de tensión del control externo de los rotors según la tabla no. 1 para asegurar que estuvieran dentro de los parámetros esperados.

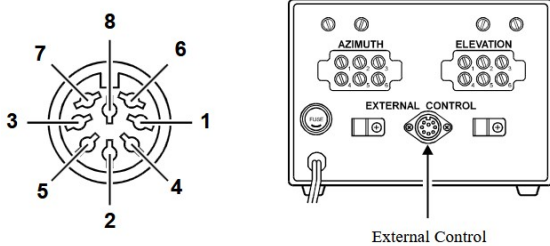


Figura 8 Puerto de control externo de los rotors

Tabla 1.- Parámetros de control externo de controlador de rotors.

Pin	Función
6	Proporciona de 2 a 4.5 VDC correspondiente de 0 a 450°
1	Proporciona de 2 a 4.5 VDC correspondiente de 0 a 180°
4	Conectar al Pin 8 para giro izquierdo (Contra horario)
2	Conectar al Pin 8 para giro derecho (Horario)
5	Conectar al Pin 8 para elevar
3	Conectar al Pin 8 para bajar
7	Proporciona 13VDC a 6 VDC arriba de 200mA
8	Tierra

Las mediciones indicaron que los voltajes eran estables y adecuados para el funcionamiento del controlador.

3. **Integración con G-Predict:** Se probó el sistema en conjunto con el software de tracking satelital G-Predict. Los resultados mostraron que el controlador era capaz de seguir con precisión las coordenadas de los satélites en tiempo real, sin interrupciones ni errores de comunicación.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las pruebas realizadas confirmaron que la rehabilitación del controlador fue exitosa, resolviendo los problemas que afectaban su operatividad. El reemplazo de componentes

defectuosos y la optimización del código en Arduino permitieron mejorar la estabilidad y la confiabilidad del sistema. La integración con G-Predict y Hamlib demostró que el controlador es funcional y capaz de operar en un entorno real utilizando el software de seguimiento satelital.

Además, esta experiencia resaltó la importancia del mantenimiento preventivo en sistemas de control de rotors, así como la necesidad de documentar detalladamente los procedimientos de configuración y programación del microcontrolador para evitar bloqueos inesperados en el futuro.

Puntos importantes para documentar:

- Diseño actual del sistema
- Especificaciones técnicas de subsistemas así como sus interconexiones entre sí
- Resolución de errores previos y posibles errores comunes
- Manual de operación de los rotors
- Hoja de especificación de las antenas
- Manual de uso de software Hamlib
- Manual de uso de software GPredict

IV. CONCLUSIONES

El proceso de rehabilitación del controlador de rotors demostró la importancia del mantenimiento y optimización de los sistemas de seguimiento satelital. La capacidad de rastrear con precisión la posición de los satélites es fundamental para la comunicación, la observación terrestre y la investigación científica.

Los sistemas de tracking satelital juegan un papel esencial en la recepción y transmisión de datos en tiempo real, facilitando la coordinación de misiones espaciales, la exploración astronómica y el monitoreo de la Tierra. Garantizar la operatividad y eficiencia de estos sistemas permite mejorar la calidad de las comunicaciones y optimizar el aprovechamiento de los recursos espaciales disponibles.

La rehabilitación permitió restablecer el correcto funcionamiento del controlador de rotors, asegurando su operatividad en tareas de seguimiento de satélites con software especializado.

Finalmente, este proyecto resaltó la importancia de contar con infraestructura confiable y personal capacitado para el mantenimiento de estos sistemas, asegurando su correcto funcionamiento y maximizando su utilidad en aplicaciones científicas y tecnológicas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó en parte con el recurso del IPN a través del proyecto SIP 20241754

REFERENCIAS

- [1] Vela, R.N., Comunicaciones por satélite, ed. T. Learning. 2003. 363
- [2] Ramón Martínez Rodríguez, O.S.R.D., Miguel Coca, Diseño preliminar de una Estación Terrena basada en Software Radio para aplicaciones docentes. 2008.
- [3] Orolia, 'OAPP Signs Agreement with Mexican Space Agency', *Safran Navigation & Timing*, 2021, <https://safran-navigation-timing.com/oapp-signs-agreement-with-mexican-space-agency/>
- [4] J. G. Flores Salgado, *Evaluación del desempeño del enlace descendente de comunicación entre un satélite de órbita baja y una estación terrena*, Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Baja California, 2021, <https://repositorioinstitucional.uabc.mx/bitstream/20.500.12930/2940/1/MXL107054.pdf>
- [5] Csete, A. (2023) 'Gpredict: Free, Real-Time Satellite Tracking and Orbit Prediction Application', *OZ9AEC*. Disponible en: <https://oz9aec.dk/gpredict/>