

Sistema de Observación de Líneas Eléctricas de Alta Tensión mediante un Vehículo Aéreo No Tripulado Radio-controlado

Norberto Lerendegui

*Departamento de Ingeniería Mecánica, Instituto Tecnológico de Buenos Aires
Av. Eduardo Madero 399. (C1106ACD) Ciudad Autónoma de Buenos Aires.
e-mail: nlerende@itba.edu.ar*

RESUMEN

En este trabajo se presenta una propuesta de sistema para observar líneas eléctricas de alta tensión en forma remota. El análisis de alternativas fue requerido por una empresa proveedora de energía eléctrica de Argentina con el objeto de reemplazar onerosos servicios de monitoreo basados en helicópteros tripulados. El sistema propuesto integra un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) comercial, una plataforma giro-estabilizada, cámaras de video e infrarrojas, electrónica de control y software de generación de informes. La meta principal fue la de reducir los costos operativos y mejorar la calidad de los informes de inspección.

La propuesta involucra las siguientes tareas a ser desarrolladas: modificación mecánica de la plataforma aérea comercial para usar simultáneamente cámaras de video y térmicas, agregado de estabilización giroscópica en dos ejes perpendiculares, diseño e implementación de un sistema servo-controlado de elevación y rotación sobre plano horizontal para apuntar la cámara al objetivo, montaje de la plataforma en el helicóptero comercial AirFoil, selección de los dispositivos de transmisión / recepción adecuados para la aplicación, preparación del hardware electrónico para adquirir video y fotografiar en tiempo real, y desarrollo del software para generar los reportes de inspección automáticamente, con almacenamiento de registros de video rotulados y gestión de base de datos.

El sistema propuesto satisface los requerimientos establecidos. Las ventajas principales son:

- Costo atractivo asociado al uso de VANT y transeptores de video comerciales,
- Transporte fácil en camionetas, debido al pequeño tamaño del VANT escogido,
- Menor tiempo de inspección de las líneas, asociado a la facilidad para establecer una base terrestre y lanzar el VANT,
- Reportes completos, mediante el uso del software especialmente desarrollado. Los registros incluyen información relevante y no requieren procesamiento posterior,
- Atractivo Retorno de Inversión, que puede ser estimado en menos de 100 horas de inspecciones aéreas..

Palabras Claves: VANT, UAV, Teleobservación, giro-estabilización.

1. INTRODUCCIÓN

La observación de Líneas de Transmisión de Potencia de Alta Tensión (LTAT) es una tarea que se realiza regularmente para evaluar la condición de las líneas, los aisladores y los vínculos. La detección temprana de problemas potenciales puede evitar interrupciones inesperadas en el suministro de energía eléctrica.

Debido a la alta tensión presente, la evaluación se realiza en forma remota mediante inspección visual. Este método permite la identificación de fisuras o erosión en los aisladores de alta tensión, desplazamientos en los conductores, caídas de ramas de árboles o daño estructural en las torres, pero no permite la detección de contactos flojos en las conexiones. Este tipo de defecto, que puede ser causado por la acción del viento o la humedad, incrementa la resistencia eléctrica de contacto, lo que puede dar lugar a un sobrecalentamiento, con la probable consecuencia de caída de tensión o rotura de línea como efectos secundarios. Estos puntos calientes pueden ser detectados usando un pirómetro, aparato para medir altas temperaturas que la radiación emitida por un cuerpo caliente como la base de su principio de funcionamiento.

Asimismo, las LTAT y sus torres soporte son a menudo difíciles de acceder mediante transporte terrestre. Las líneas usualmente atraviesan campos de cultivo o ganadería privados, terreno irregular, u otras áreas de difícil acceso para las camionetas o vehículos de carga que transportan a los inspectores y el instrumental de medición y observación. El equipamiento empleado incluye dispositivo de registro continuo de datos de información de video y señal infrarroja, para realizar un análisis posterior en el laboratorio. Por lo tanto, la forma más conveniente de realizar la inspección de las LTAT es mediante vía aérea.

En Argentina [1], esta inspección es realizada de dos maneras:

- Observación desde tierra, mediante un equipo de expertos que se mueven a lo largo de las líneas de transmisión usando vehículos terrestres. Los resultados de la observación se consignan en formularios especiales
- Inspección aérea, mediante un helicóptero con una tripulación de dos personas: el piloto y el inspector técnico. El piloto es responsable de la conducción del helicóptero de acuerdo con un plan de vuelo predefinido (siguiendo una línea en particular, manteniendo el helicóptero en posición estable para realizar las tele-mediciones, etc.). El inspector técnico opera el pirómetro, la cámara de video con acercamiento (zoom) y el video-grabador, y registra los hallazgos en el formulario de informe de prueba.

La inspección aérea evita los problemas del terreno, pero todo el trabajo debe ser realizado durante el vuelo. Esta actividad tiene que ser desarrollada cuidadosamente, manteniendo una distancia prudencial de las LTAT para evitar accidentes, pero suficientemente próxima para tener una clara visión. El helicóptero vuela usualmente entre 18 y 30 metros por encima del nivel del terreno y a lo largo de una distancia de 10 km. El costo del servicio de helicóptero

puede llegar a ser de 600 dólares norteamericanos por hora. Se han reportado casos de accidentes que involucraron helicópteros de inspección de LTAT [2] [3].

Una de las más grandes compañías de energía eléctrica en Argentina requirió al Instituto Tecnológico de Buenos Aires (ITBA) una propuesta para mejorar el proceso de inspección de las LTAT. La Tabla 1 resumen un caso típico de inspección de una red de LTAT.

Tabla 1: Ejemplo de Red LTAT a inspeccionar

Tensión	Altura de las Líneas de Transmisión	Largo Total de las Líneas de Transmisión	Distancia entre torres vecinas
220 kV	18 a 27 metros	270 kilómetros	400 a 500 metros
132 kV	9 a 23 metros	300 kilómetros	80 a 160 metros

La meta primaria del proveedor de energía eléctrica era la reducción de los costos operativos y la generación automática de informes de inspección completos. El Laboratorio de Mecatrónica del Departamento de Mecánica del ITBA estuvo a cargo del proyecto.

El enfoque seguido para la propuesta fue la de reducir los costos operativos utilizando un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) [4] con el objeto de llevar los instrumentos de medición y observación suficientemente próximos a la LTAT, permitiéndole al técnico desarrollar la inspección trabajando en forma segura a nivel de tierra. Los VANT se suelen conocer por su sigla en inglés UAV (Unmanned Aerial Vehicle).

La propuesta de proyecto comprende dos partes principales:

- Desarrollo de un sistema de vehículo aéreo radiocontrolado, con vuelo guiado por visión perimetral, capaz de trabajar con estabilidad posicional basada en GPS (Global Positioning System), funcionalidad a ser desarrollada en una segunda etapa.
- Desarrollo de un sistema de observación remoto, incluyendo el registro remoto en tiempo real de señales térmicas y de video recogidas por cámaras montadas sobre una plataforma estabilizada instalada en el vehículo aéreo.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

2.1. Especificaciones

En base a las especificaciones establecidas por la compañía de energía eléctrica, se establecieron los principales parámetros de diseño: altura y dirección de vuelo (manual o semiautónomo), despegue/aterrizaje (manual), tamaño de vehículo (capaz de ser transportado en camioneta), autonomía de combustible, tamaño y peso de la cámara de video (con zoom), tamaño y peso de la cámara de registro térmico, plataforma estabilizada, sistema de transmisión de video, estación de control terrestre y sistema de adquisición de video.

El primer análisis llevado a cabo involucró la selección del VANT. Tres escenarios fueron estudiados:

- 1) Pequeño aeroplano (a ser desarrollado por el ITBA)
- 2) Helicóptero radio-controlado (a ser desarrollado por el ITBA)
- 3) Helicóptero comercial radio-controlado, con mecánica y electrónica adicionales a ser desarrolladas por el ITBA [5]

La aerodinámica del aeroplano es más simple que la del helicóptero [4]. No obstante, la primera opción fue descartada debido a que no proveía la aproximación y estabilidad requeridas para el procedimiento de medición. La segunda alternativa fue descartada después de analizar los costos y tiempos de desarrollo. Finalmente, se optó por el uso de un helicóptero VANT comercial radio-controlado.

Después del análisis de los otros parámetros de diseño, la propuesta final incluyó las siguientes partes: VANT, plataforma giro-estabilizada, cámaras de video e infrarrojo, enlace y adquisición de video, e integración del sistema (adaptación de la plataforma, implementación del servocontrol de movimiento de cámaras, implementación de electrónica de conexión, ensamble de partes y desarrollo del software de generación de informes)

2.2. Vehículo Aéreo No Tripulado

En el mercado mundial hay varias compañías fabricantes de mini-helicópteros no-tripulados auto-estabilizados para ser utilizados como una plataforma aérea para fotografía, vigilancia e inspección de tuberías. Yamaha (www.yamaha-motor.co.jp) en Japón, Schiebel (www.schiebel.com) en Austria y Steadicopter (www.steadicopter.com) en Israel venden helicópteros a precios por encima de los u\$s 150.000. Por otro lado, en EEUU Neural Robotics, Inc.. (www.neural-robotics.com) y Rotomotion, LLC (www.rotomotion.com) fabrican el AutoCopter y el SR-series, respectivamente, a precios inferiores a u\$s 50.000.

La compañía AirFoil Aviation (www.airfoilsycam.com) provee helicópteros radio-controlados de corto rango (5 km) para fotografía aérea a precios por debajo de los u\$s 25.000. La compañía ha desarrollado recientemente un sistema de montaje para fotografía, video-fotografía y termo-fotografía que puede ser usado en helicópteros radio-controlados del tipo Size-60 (1,5 metros). Teniendo en cuenta los precios y las características del sistema de montaje (plataforma), el VANT ofrecido por AirFoil fue la opción escogida para el proyecto.

Las características de los helicópteros AirFoil son las siguientes:

- Largo: 1,5 metros, Ancho: 30 cm, Carga útil: 5,5 kg
- Rotor: 2 metros de diámetro, Velocidad: 1450-1550 rpm
- Motor: combustion interna, 2 tiempos, 26 cm³ nafta
- Radio-Control: JR9303 PCM,
- Estabilización: Gyro 401 con control 9254 para rotor de cola

Las características de la plataforma de montaje de la cámara son las siguientes:

- Rotación (roll) autonivelada de 360 grados con servocontrol de velocidad progresiva
- Funciones de paneo (panning) y elevación (tilting), con embrague deslizante para la función de elevación y estabilización giroscópica
- Enlace de video a tierra y baterías de NiMH de 2.150mAh

De acuerdo con el fabricante, el helicóptero puede funcionar en condiciones extremas desde 15 grados bajo cero hasta 40 grados sobre cero, y con vientos de hasta 65 km/h. Las únicas condiciones climáticas que limitan el uso del sistema son la lluvia o la nieve. Generalmente este VANT puede volar hasta 30 metros de altitud durante 30 minutos, usando una mezcla básica de nafta y aceite, típica en los motores de dos tiempos.

Como se mencionó anteriormente, el proceso de teleobservación requiere dos personas: un piloto y un camarógrafo en contacto continuo. Una vez en el sitio, el camarógrafo preparará el vínculo radioeléctrico, el monitor y el montaje de las cámaras, y encenderá el equipamiento, constituido por las cámaras, los giróscopos de la plataforma y los demás elementos.

La unidad puede enviar las imágenes (normal y térmica) a tierra mediante un video-transmisor a bordo del helicóptero para que sean registradas en tiempo real, y permitirle al inspector buscar e identificar defectos en la LTAT.

El montaje AirFoilPro1 permite el aterrizaje o despegue en cualquier dirección y también tiene la habilidad de rotar 360 grados sin afectar el cableado. Todas las partes están certificadas y la estructura está construida con Aluminio 6061T6 y Fibra de Carbón.

La plataforma también incorpora servos con engranajes metálicos y un sistema de liberación de embrague para la función de elevación de cámara (tilt) y un amortiguador hidráulico para la rotación sobre un plano horizontal (roll). El peso de la plataforma es de 2kg. Por ejemplo, si se utilizara un estabilizador giroscópico Kenyon KS2 y una cámara Panasonic GS400 3CCD, el conjunto pesaría aproximadamente 3,9 kg. Un receptor GPS podrá ser montado en una segunda etapa para proveer navegación semi-autónoma. Mediante el uso de una computadora Laptop se construiría una grilla de puntos GPS sobre el mapa de ubicaciones deseadas.

La Figura 1 muestra la plataforma para las cámaras. El estabilizador giroscópico es mostrado en la parte de atrás y la cámara a la izquierda. La Figura 2 muestra el sistema montado en un helicóptero radio-controlado.



Figura 1: Plataforma de cámaras



Figura 2: Plataforma montada en el helicóptero

2.3. Plataforma giro-estabilizada

La implementación de una plataforma capaz de sostener una cámara de video y una térmica, con movimientos controlados de elevación y paneo, requiere el uso de un dispositivo de estabilización [6]. El estabilizador es un instrumento de precisión que incrementa la efectividad de las cámaras, los binoculares o cualquier otro equipo óptico de mano.

En general, estos dispositivos utilizan dos ruedas giroscópicas, una en cada extremo, de modo de estabilizar frente a movimientos de cabeceo (pitch) y guiñada (yaw), causados por el movimiento vehicular. Si se lo acopla adecuadamente a la cámara, el estabilizador extiende substantivamente el rango de discriminación de los observadores. Los objetos pueden ser claramente identificados a una distancia más lejana.

Kenyon Laboratories (www.ken-lab.com) es uno de los mayores fabricantes de estabilizadores giroscópicos. Sus giróscopos están energizados con una tensión de 115VAC/400Hz, normalmente obtenida de una batería mediante un dispositivo electrónico inversor, y tardan de 3 a 5 minutos en alcanzar su máxima velocidad angular. Cualquier movimiento rápido distinto del desplazamiento vertical causará la oposición de sus ruedas volante hasta que la unidad vuelva nuevamente al reposo. Para el proyecto se seleccionaron los modelos Kenyon KS-2 y KS-4, cuyas especificaciones son:

- Estabilización: contra movimiento de cabeceo (pitch) y guiñada (yaw)
- Tamaño: 7cm de diámetro y 11,5cm de largo
- Volantes giroscópicos: dos ruedas de precisión balanceadas.
- Velocidad: aproximadamente 21.000 rpm luego de 4min de aplicada la alimentación
- Construcción: aleación de aluminio, herméticamente sellada con helio en el interior, y con rodamientos de bolilla de precisión en cada parte móvil
- Peso: KS-2: 680g; KS-4: 1kg
- Tensión: 115VAC/400Hz/12W, con un consumo inicial de 4W

2.4. Cámaras de Video e Infrarrojas

Hay varios tipos de cámaras térmicas. Por ejemplo, la cámara Omega es ultra-compacta, de bajo peso y utiliza detectores microbolométricos. Estos detectores se combinan con procesamiento de señal sobre el plano focal para producir una excelente calidad de imagen y resolución térmica (con ruido menor que 40mK).

Esta cámara permite la operación con ultra-bajo consumo y la generación de imágenes en menos de 2 segundos. Tiene salidas tanto analógica RS-170A (CCIR) como digital de 14 bits, para aplicaciones industriales de visión. La cámara de imagen térmica está diseñada para distinguir una diferencia de temperatura de 0,5°C. Para el registro de video estándar es posible usar cámaras livianas tales como la Panasonic GS400 3CCD. La Figura 3 muestra el sistema completo armado con las dos cámaras.

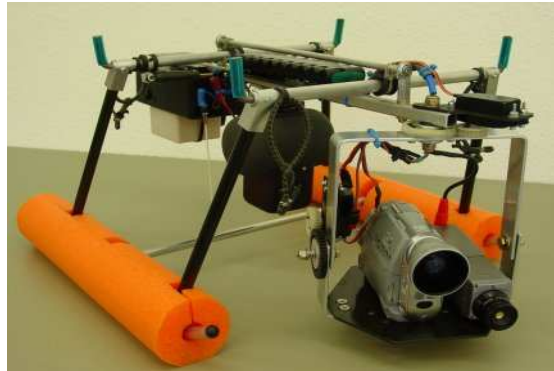


Figura 3: Sistema completo con cámaras de video y térmica

2.5. Sistema de transmisión, recepción y adquisición de imágenes

La Figura 4 muestra el diagrama en bloques del sistema de transmisión, recepción y adquisición de imágenes.

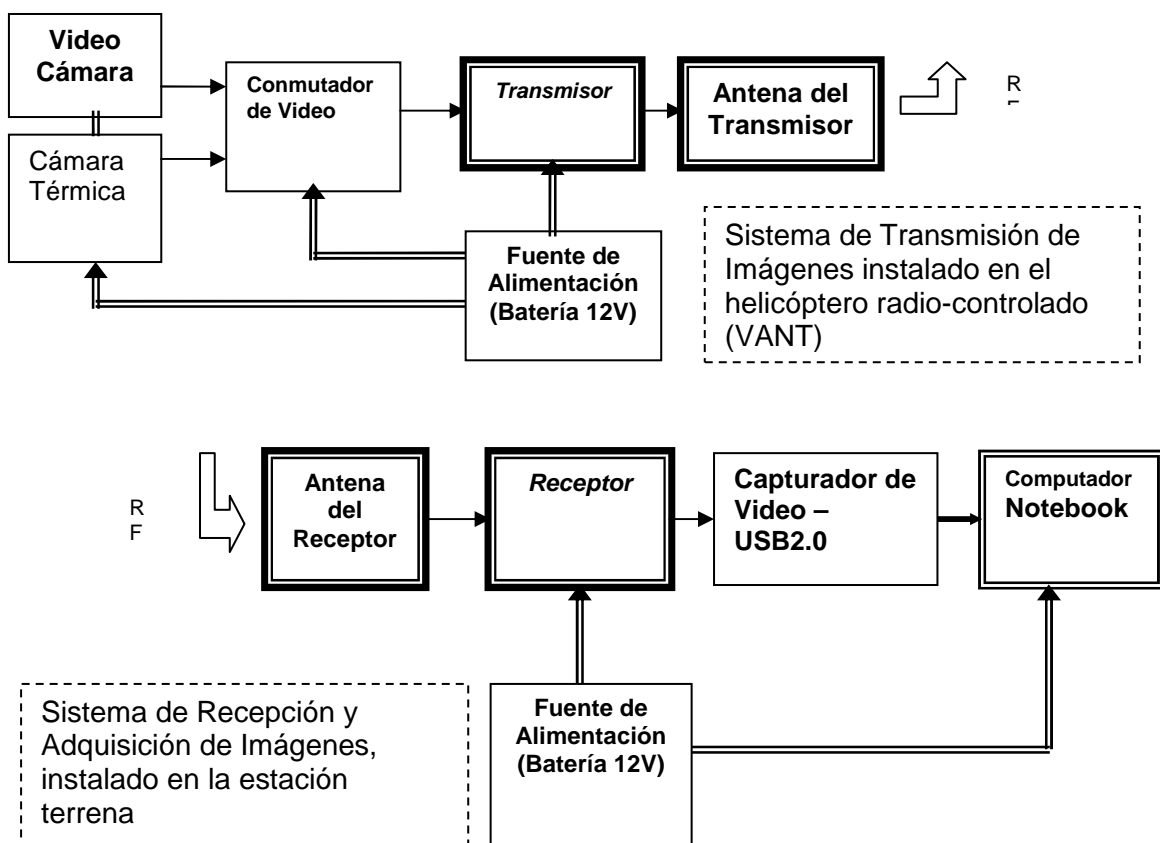


Figura 4: Sistema de Transmisión, Recepción y Adquisición de Imágenes

En el mercado hay dispositivos comerciales para la transmisión de imágenes (video color compuesto) desde el aire y la recepción en una locación fija terrena (<http://rf-links.com>). Estos

dispositivos pueden llegar a tener un rango de 5km, con un máximo de 32km usando sofisticadas antenas direccionales. Hay también antenas de bajo peso y bajo consumo, y dispositivos de transmisión que son ideales para ser usados en helicópteros radio-controlados, pero con un más corto rango de distancia.

Hay tres bandas de frecuencia normalmente usadas. 900 MHz (UHF), 2,4 GHz y 5,8 GHz (microondas). La primera banda involucra una región del espectro que es empleado por telefonía celular, y, en general, se requiere que el operador posea una licencia de radio. Las restantes dos bandas a menudo utilizan la técnica de espectro ensanchado (Spread Spectrum) y en muchos países están categorizadas como bandas ISM (Industrial, Científica y Médica).

Las bandas de 2,4GHz y 5,8Ghz poseen regulación legal menos exigente, y por lo tanto son usadas actualmente en sistemas de vigilancia aérea, particularmente la primera. En Argentina, estas dos bandas están reguladas por la siguiente normativa emanada de la Secretaría de Comunicaciones:

- 302 SC/98: Sistemas de Espectro Ensanchado
- 463 SC/2001: Asignación de bandas 2400 – 2483.5 MHz y 5725 – 5850 MHz para el servicio de telecomunicaciones con equipamiento referido por la norma 302 SC/98.

El sistema de recepción incluye una antena receptora adecuada para la banda de trabajo establecida y un receptor para los canales usados en la transmisión. Particularmente, estos sistemas son fuertemente unidireccionales, y por lo tanto las antenas están usualmente orientadas cara-a-cara con el objeto de tener una línea de visión directa entre la estación de control y el vehículo aéreo.

La señal de video (y eventualmente la de audio) recogidas por el receptor es enviada al módulo de captura con interfaz USB2.0 que digitaliza la información de video para un procesamiento posterior en una PC. La interfaz USB2.0 maneja 480 Mbit/s y garantiza una conectividad no-invasiva con cualquier sistema de procesamiento compatible con este estándar.

Para esta aplicación es conveniente trabajar con una computadora Notebook, dado que la estación de control será un vehículo terrestre estacionario, careciente de alimentación de 220VAC/110VAC.

En el caso de helicópteros radio-controlados con un alcance de 5km, el peso del transmisor con su antena y el consumo de potencia juegan un rol muy importante. El helicóptero escogido puede transportar una carga neta de 5,5 kg, distribuida entre la plataforma, las cámaras, las baterías y el sistema de transmisión. El consumo del transmisor y las cámaras limitarán la autonomía del VANT.

La Figura 5 muestra la configuración del sistema escogido con un transmisor de video de 8 canales trabajando en la banda 2,3-2,5GHz con una potencia de 200mW sobre una carga de 50 ohm, y pesando 20 gramos. El rango del enlace es 3 millas, pero puede ser incrementado con una selección adecuada de la antena receptora, con transmisión en línea de visión directa.

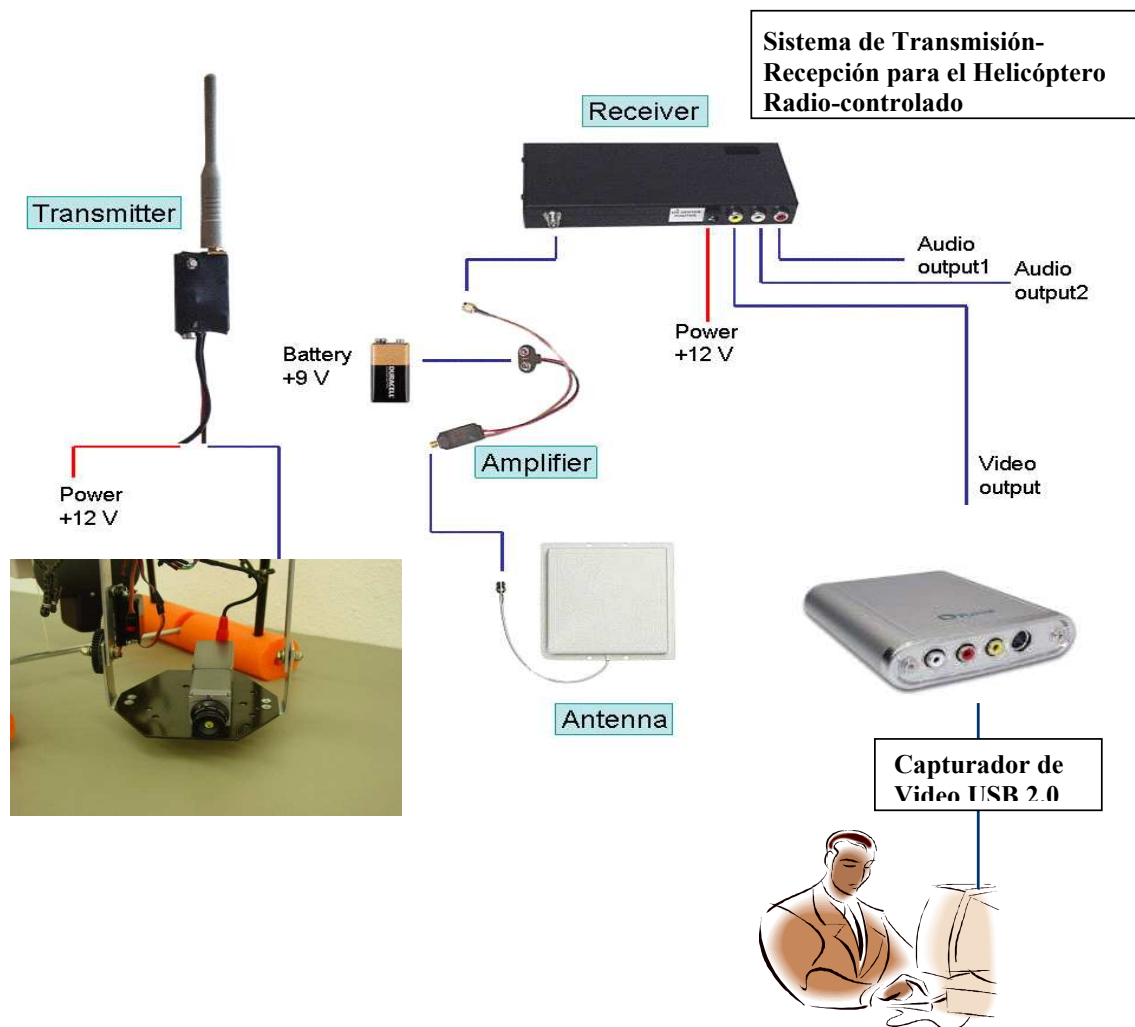


Figura 5: Sistema de transmisión, recepción y captura de imagen escogido

El sistema de enlace de video elegido incluye: transmisor de 8 canales de 200mW con su antena transmisora, Receptor de 8 canales con su antena receptora, Amplificador de señal recibida, Módulo de Captura de Video USB2.0 y Cables de Conexión.

Es posible usar otros dispositivos para incrementar el rango hasta 16 km, pero es necesario analizar cuidadosamente el impacto en la capacidad y autonomía del vehículo. Por ejemplo, un transmisor operando a 5W en la banda 2,4Ghz (ISM) puede tener una dimensión de 15cm x 7,5cm x 2,5cm, un peso de 350 gramos y un consumo de 1,8 Amperes trabajando a 12V. Por el contrario, un pequeño transmisor de 200mW tendría un tamaño de 4cm x 2cm x 0,6cm, pesando 20 gramos y consumiendo 150mA a 12V. Con una batería de 0,9Ah, el primer sistema tendría una autonomía de sólo 30 minutos mientras que el segundo tendría 6 horas. Adicionalmente, la carga útil en el primer caso se vería disminuida en 600 gramos (batería + antena-dipolo + transmisor), mientras que en el segundo caso sólo 150 gramos.

2.6. Integración del Sistema

La propuesta de proyecto preparada para la compañía eléctrica involucra la integración de productos comerciales con mecánica, electrónica y software desarrollados por el ITBA. Las tareas a ser realizadas son las siguientes:

- Modificación de la plataforma comercial AirFoilPro1 para usar cámaras de video y térmica simultáneamente, agregando estabilización giroscópica
- Diseño e implementación de un sistema servo-controlado de elevación y paneo sobre el plano horizontal, para lograr que las cámaras apunten al objetivo.
- Montaje de la plataforma en el helicóptero AirFoil
- Selección de los dispositivos de transmisión y recepción adecuados para la aplicación
- Ensamble del Hardware para adquirir video y fotografías en tiempo real
- Desarrollo de una aplicación de software para generar los informes de inspección automáticamente, con almacenamiento de registros de video rotulados y base de datos

3. CONCLUSIONES

Si bien el sistema propuesto no fue implementado aún, en principio satisfaría los requerimientos establecidos por la empresa de energía eléctrica para realizar la inspección de LTAT. Las principales ventajas serían:

- Costo atractivo basado en el uso de VANT y video-transceptores de RF comerciales
- Fácil transporte del VANT en camionetas convencionales, debido al pequeño tamaño del VANT escogido
- Tiempos de inspección de secciones de redes LTAT menores, debido al sencillo establecimiento de la estación terrena y la rápida puesta en operación del VANT
- Informes completos mediante un software especial que genera registros de inspección. El registro incluye información visual y térmica relevante, y por lo tanto no hace falta un posterior procesamiento

4. REFERENCIAS

- [1] www.transener.com.ar, Mantenimiento Predictivo y Preventivo
- [2] <http://pdf.diariohoy.net/1998/11/10/c24y25.pdf>
- [3] <http://www.jiaac.gov.ar/accidentes/97/0999%20LV-VHN.htm>
- [4] L. Ma and Y. Chen, Aerial Surveillance System for Overhead Power Line Inspection, CSOIS UTA State University, Technical Report USU-CSOIS-TR-04-08, 2004
- [5] D. Jones, *Proceedings of The IEE Forum on: Autonomous Systems (Ref. No. 2005/11271), Power Line Inspection – a UAV concept*, IEE Press, 2005
- [6] N. Mayer, A. Forough-Nassiraei, Z. Hsu, F. Farkas, T. Christaller, *Climbing and Walking Robots*, capítulo *Stabilizing Dynamic Walking with Physical Tricks*, Ed. Springer Berlin Heidelberg, Alemania, 2005