

Diseño mecánico preliminar y básico de un sistema para inspección remota de infraestructura eléctrica

*Luis Benigno Gutiérrez, Director e investigador principal Grupo A+D.
Juan M. Vásquez, Docente investigador Grupo A+D.
Correo electrónico: lbgutie@ieee.org*

Grupo de Investigación en Automática y Diseño A+D

RESUMEN

Robots teleoperados y vehículos no tripulados han sido usados cada vez con mayor frecuencia para tareas de inspección remota de infraestructura eléctrica. En este artículo se describe el proceso de diseño preliminar y básico de un sistema automático para esta labor. En el diseño preliminar se revisa el estado del arte y se estudian diversas alternativas robóticas; se identifican variables de diseño y se ordenan según su importancia mediante una matriz de decisión, con el fin de seleccionar la mejor plataforma que permita cumplir con los requerimientos del problema; de esta forma se elige un vehículo aéreo no tripulado de ala fija en razón a su alcance, rango, velocidad y capacidad de carga. En el diseño básico se identifican los subsistemas que irán a bordo de la aeronave: cámara, telecomunicaciones, propulsión, aviónica, aeronavegación, recuperación y emergencia; para cada subsistema se plantean y evalúan alternativas y se elige la solución. Finalmente, se hace una integración de subsistemas y una distribución de los elementos en el fuselaje.

Palabras clave: Líneas de transmisión de energía eléctrica, inspección remota, automática, mecatrónica, robótica, diseño mecánico, vehículos aéreos no tripulados.

INTRODUCCIÓN

El sistema de interconexión eléctrica hace parte de la infraestructura de cualquier país y, por tanto, es un componente crítico para el desarrollo socio-económico. La empresa de Interconexión Eléctrica S.A. (ISA) está encargada de la construcción, operación y mantenimiento de las líneas de transmisión eléctrica en Colombia, que van desde las centrales de generación hasta las subestaciones de distribución locales y regionales.

La inspección periódica de las líneas de transmisión es una de las tareas básicas del mantenimiento; para ello, cuadrillas de ingenieros y técnicos recorren por tierra y aire tramos de varias decenas de kilómetros para evaluar el estado físico de cada uno de los componentes de la línea (cables, herrajes, aisladores, torres, anclajes y servidumbre).

Esta labor de inspección es bastante difícil y peligrosa debido a la topografía del país, el clima, las limitadas vías de acceso y sobre todo, la situación del orden público en ciertas zonas por donde pasa el sistema de interconexión. En particular, cuando la guerrilla realiza un atentado y derriba una torre, los técnicos de ISA pueden demorarse hasta varias semanas en llegar al sitio e iniciar las labores de reparación; esto obedece a que primero el Ejército debe ingresar, asegurar la zona y desactivar las minas dejadas por los insurgentes, para que luego los técnicos lidien con el problema del acceso terrestre o aéreo.

Ante esta problemática, la Universidad Pontificia Bolivariana propuso a Colciencias y a ISA, investigar y diseñar un sistema automático para inspección remota de líneas de transmisión eléctrica. En esta primera fase del proyecto han intervenido los Grupos de Investigación en Automática y Diseño (A+D), Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica (T&D), Informática y Telecomunicaciones (GIDATI), Microelectrónica y la Facultad de Ingeniería Aeronáutica, con el apoyo de las empresas Industrial Aeronáutica y Telsat.

METODOLOGÍA

En la primera fase del proyecto, se aplicó el procedimiento de diseño mecánico preliminar y básico. Éste contempla, después del planteamiento del problema, la revisión del estado del arte, la recolección de datos cualitativos y cuantitativos, la identificación y jerarquización de variables cualitativas y cuantitativas de diseño y por último, la selección de la solución. En el diseño básico se identifican los subsistemas del prototipo, se plantean y evalúan alternativas, y se elige la mejor solución para cada subsistema; luego se integran los subsistemas para comprobar su compatibilidad. Como resultado, se obtiene un bosquejo del sistema y una estimación de sus características para el posterior diseño de detalle.

DISEÑO PRELIMINAR

REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

En la revisión de la bibliografía existente se encontraron múltiples antecedentes de plataformas robóticas para inspección de líneas eléctricas. Estos casos se agruparon en seis alternativas. Tres de ellas son plataformas que se desplazan por los cables: brazos articulados, teleférico autopropulsado y sistema híbrido; las otras tres corresponden a vehículos aéreos no tripulados (ala rotatoria, ala fija y aerostático).

Se encontraron robots inspirados en la tecnología BEAM (Biology Electronics Aesthetics Mechanics), la cual busca emular a través de ellos, los sistemas de movimiento de diversas especies animales. Algunos de estos robots tienen brazos articulados que les permiten desplazarse por cables como lo hacen los primates (Figura 1), lo que posibilita negociar con obstáculos en las líneas.

Se consideró también adaptar un sistema comercial de teleférico autopropulsado. Este sistema posee poleas motrices que ruedan sobre un cable estático, lo que resulta mucho más eficiente para desplazarse a través de los vanos de la línea. Ejemplos de esto son los robots para instalación de balizas en líneas eléctricas y robots para remoción de hielo.



Figura 1. Prototipo de robot trepador, robot con sistema teleférico y robot híbrido.

Otros autores reportan el diseño de sistemas híbridos. Estos combinan brazos articulados para negociar obstáculos con poleas motrices para desplazarse con mayor eficiencia por los vanos entre torres. La principal desventaja es la complejidad constructiva del robot y de su sistema de control, necesaria para las maniobras de negociación con la torre y la conmutación del sistema de desplazamiento.

Por otra parte, se tienen varios antecedentes sobre el uso de vehículos aéreos no tripulados de ala fija –helicópteros– para la inspección remota de líneas eléctricas. Entre ellos está el modelo RMAX – IIG de Yamaha, usado en Japón y otros países, en la inspección de líneas eléctricas y otras aplicaciones civiles.

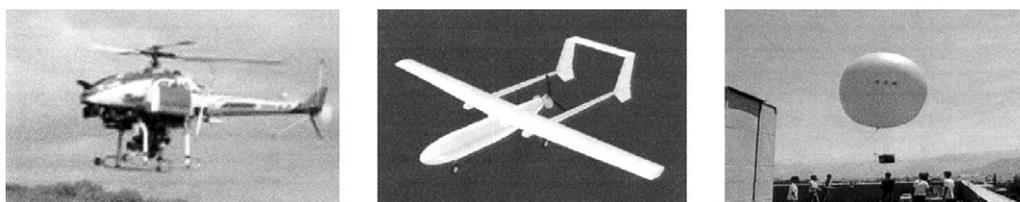


Figura 2. RMAX – IIG de Yamaha, UAV AURA y dirigible experimental.

Las principales ventajas del helicóptero son su gran maniobrabilidad y su capacidad de permanecer quieto en el aire para tomar imágenes de acercamiento. Sus desventajas son su baja capacidad de carga, autonomía, rango, eficiencia y un techo de operación limitado.

En cuanto a aviones no tripulados, hay una gran cantidad de modelos civiles y militares dedicados a labores de inspección y vigilancia. Basados en el estudio del estado del arte de estos aparatos, los miembros del Semillero de Investigación de la Facultad de Ingeniería Aeronáutica han propuesto un prototipo de avión tipo pusher llamado AURA. Este avión ofrece ventajas como una mayor capacidad de carga, autonomía, rango, velocidad y respuesta ante contingencias, techo de operación, eficiencia y mejor capacidad de evasión.

La última opción considerada es la de los globos dirigibles no tripulados. Se encontró que estos aparatos ofrecen muy baja capacidad de carga, muy baja velocidad, pobre maniobrabilidad y sensibilidad ante agentes meteorológicos. Los antecedentes encontrados solamente se usan para investigación y aplicaciones en interiores.

CRITERIOS DE SELECCIÓN

Para comparar las diferentes alternativas y tomar una decisión sobre la plataforma a diseñar, se identificaron inicialmente 36 variables cualitativas y cuantitativas. Luego de un procedimiento de calificación cuantitativo de las variables (matriz de Moody), se redujo la lista a 15 variables que pueden apreciarse en orden de importancia en la Tabla 1.

SELECCIÓN DE LA SOLUCIÓN

Estas variables se tomaron como criterios de comparación y decisión de las alternativas anteriormente presentadas. Para ello, se construyó otra matriz donde se calificaba cada alternativa respecto a cada una de las 15 variables y se asignó una distribución de pesos no lineal para ponderar cada calificación; al final se totalizaron los resultados, como se puede apreciar en la Tabla 2.

Los resultados favorecieron al avión, seguido de cerca por el helicóptero. Esto obedece a que se le dio más importancia a la velocidad del aparato para llegar rápidamente al sitio donde se presenta el daño, la capacidad de carga para llevar cámaras y otros elementos de telemetría, y a la autonomía y el rango para desarrollar misiones entre subestaciones distantes (hasta 350 kms).

TABLA 1. JERARQUIZACIÓN DE VARIABLES

Nº	Variable
1	Seguridad de la línea
2	Autonomía
3	Inspección visual detallada
4	Capacidad para pasar torres y obstáculos
5	Inspección visual panorámica
6	Alcance
7	Rango
8	Independencia de los factores climáticos
9	Eficiencia
10	Independencia del operador
11	Confiabilidad de la plataforma
12	Techo de operación
13	Capacidad de carga
14	Capacidad de evasión
15	Termografía

En último lugar, quedaron los robots que se desplazan por las líneas. Entre estos, el mejor es el robot híbrido ya que combina la eficiencia de la polea con la habilidad de pasar obstáculos de los brazos articulados.

El avión no puede realizar una inspección con acercamiento, ni labores de medición de contacto, instalación de elementos o reparación en las líneas. Por esto, se dejó planteada la posibilidad de desarrollar un robot híbrido en un proyecto posterior, con la intención de cubrir las funciones anteriormente mencionadas que hacen parte normal del mantenimiento de las líneas.

DISEÑO BÁSICO

IDENTIFICACIÓN DE SUBSISTEMAS

La parte central del diseño básico de toda máquina es dividirla en subsistemas, es decir, conjuntos de elementos funcionales afines entre sí. De esta forma se puede analizar cada subsistema por separado sin olvidar su interacción con otros. A través

del trabajo conjunto de los diferentes grupos que participan en el proyecto, se logró identificar los subsistemas que irían a bordo del UAV. En la Figura 3 se muestran los subsistemas y los flujos de energía, masa e información que existen entre ellos.

TABLA 2 CALIFICACIÓN DE ALTERNATIVAS

N°	Variable	Trepador	Teleférico	Híbrido	Helicóptero	Avión	Dirigible
1	Seguridad de la línea	6.53	6.53	7.98	16.69	19.69	15.97
2	Autonomía	10.12	11.38	10.75	9.48	11.38	9.48
3	Inspección visual detallada	10.36	10.36	10.36	10.90	8.18	10.36
4	Capacidad para pasar torres y obstáculos	4.18	1.39	5.57	10.22	10.22	9.75
5	Inspección visual panorámica	5.46	5.46	5.85	8.98	8.59	8.98
6	Alcance	5.48	5.81	5.81	5.48	6.13	5.81
7	Rango	3.14	3.40	3.40	4.44	5.23	4.18
8	Independencia de los factores climáticos	3.92	3.92	3.92	2.06	2.89	1.45
9	Eficiencia	1.26	1.42	1.26	2.37	3.32	2.53
10	Independencia del operador ^{1.51}	1.63	1.51	1.74	1.74	1.97	
11	Confiabilidad de la plataforma	1.13	1.13	1.13	0.89	1.13	0.89
12	Techo de operación	1.24	1.24	1.24	0.77	1.03	0.72
13	Capacidad de carga	0.46	0.46	0.44	0.29	0.38	0.26
14	Capacidad de evasión	0.08	0.09	0.09	0.27	0.26	0.08
15	Termografía	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	0.02
120	Resultados	54.93	54.28	59.37	74.66	77.21	72.45

Los subsistemas identificados son:

- *Cámara: es la parte central de la misión, necesaria para registrar en video imágenes de la línea y sus alrededores; este subsistema incluye la cámara misma y el sistema de control para giroestabilización y autotracking.*

DISEÑO BÁSICO UAV AURA – SUBSISTEMAS

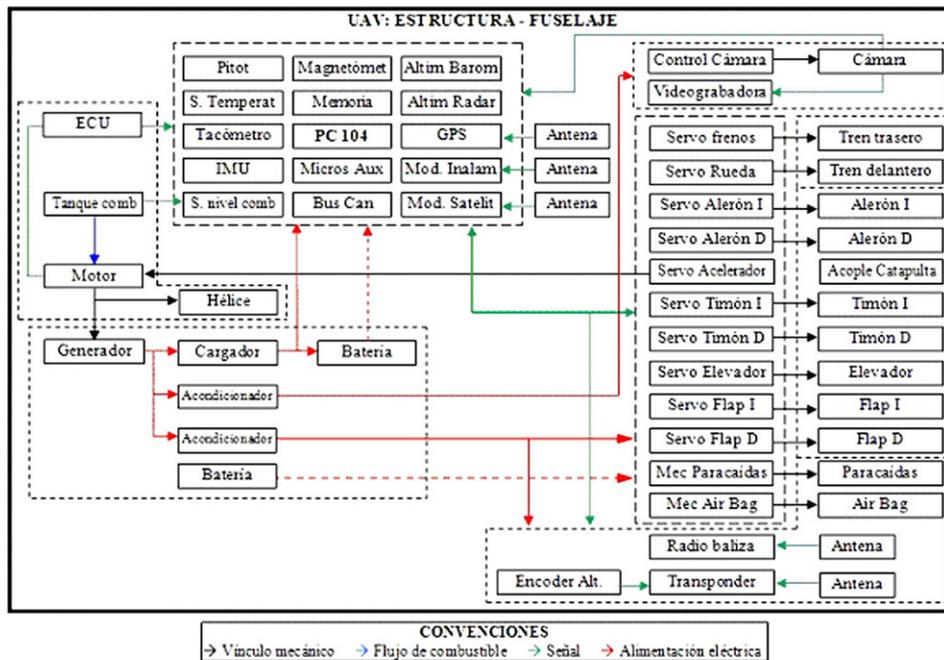


Figura 3. Subsistemas del UAV AURA.

- *Telecomunicaciones:* es la parte encargada del envío bidireccional de datos entre la plataforma y las estaciones de control en tierra; incluye un sistema de comunicación satelital y un sistema de módem inalámbrico, cada uno con su propia antena.
- *Guía, navegación y control:* es la parte encargada de la medición de variables de navegación, procesamiento de datos y control de la aeronave; incluye varios sensores, un bus CAN para comunicación serial entre elementos y el hardware de adquisición y procesamiento de datos necesario para conocer y controlar la ubicación, actitud, velocidad y aceleración del UAV.
- *Propulsión:* es la parte que genera potencia mecánica para la propulsión de la aeronave; incluye el motor de combustión interna y sus complementos, la hélice y el tanque de combustible.

- *Alimentación eléctrica: es la parte que suministra la alimentación eléctrica de los sistemas a bordo de la aeronave; incluye el generador acoplado al motor, acondicionadores de voltaje, cargadores y baterías de respaldo.*
- *Actuadores: es el conjunto de servomotores que mueven las superficies de control de vuelo de la aeronave y operan otros elementos mecánicos como la dirección del tren delantero, los frenos del tren trasero, el sistema de despliegue del paracaídas y el del sistema contra impacto.*
- *Seguridad y recuperación: agrupa algunos elementos obligatorios para la seguridad en la navegación aérea; incluye luces navegación, transponder, baliza de emergencia, paracaídas y su mecanismo de despliegue y un sistema de protección contra impacto.*
- *Estructura: es la parte que contiene y soporta todos los demás elementos de la aeronave; incluye el fuselaje, las alas, la cola con sus respectivas superficies de control.*
- *Despegue y aterrizaje: corresponde a los trenes de aterrizaje, incluidas las llantas, rines y frenos.*

PLANTEAMIENTO Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

Para cada subsistema se establecieron criterios de selección de acuerdo con los requerimientos particulares del problema. Luego se realizó una revisión ampliada del estado del arte para identificar posibles alternativas, tanto para elementos comerciales como manufacturados. Finalmente, cada subgrupo de trabajo eligió la mejor alternativa y aportó la información técnica y económica de cada elemento.

INTEGRACIÓN DE SUBSISTEMAS

Una vez se determinó la totalidad de componentes a bordo, se procedió a su distribución dentro de la aeronave (lofting). Para ello, se dividió el fuselaje en ocho secciones con accesos independientes y divididas por paredes con pasacables para las señales y la alimentación eléctrica. De adelante hacia atrás, cada sección contendrá: a) aviónica, b) tren delantero y dirección, c) cámara y carga útil extra, d) paracaídas y airbag, e) tanque de combustible y trenes traseros, f) fuente y baterías, y g) motor.

De la integración de los componentes se obtuvo también el peso total y su consumo eléctrico. Estos datos servirán de punto de partida para el diseño de detalle. Hasta ahora las características estimadas para el UAV son las siguientes: 7 metros de envergadura, 5 metros de longitud, 250 kg. de peso máximo al despegue, 50 kg. de carga útil, 4 horas de autonomía, rango de 350 kilómetros, velocidad mínima de 90 km/h, velocidad máxima de 150 km/h, longitud mínima de despegue de 100 metros y un techo de operación de 10000 pies (3.300 metros sobre el nivel del mar).

CONCLUSIONES

El UAV de ala fija es la plataforma más apropiada para los requerimientos de inspección remota planteados por ISA. Se destaca su mayor autonomía, alcance y rango, alta velocidad de reacción a imprevistos, capacidad de carga, capacidad de evasión, confiabilidad y maniobrabilidad.

Se descartaron las alternativas de vehículos que se desplazan por el cable, básicamente por su baja eficiencia, baja velocidad y limitada capacidad de carga. Además, está el riesgo de falla que pueda generar el robot durante su desplazamiento sobre la línea y la de alimentarse a partir del cable de fase por medio de acoples inductivos. Se descartó el helicóptero y el dirigible debido a sus desventajas respecto al avión: capacidad de carga, rango, autonomía, techo de operación, etc.

Dado que el avión no permite el contacto con la línea para llevar a cabo mediciones, reparaciones o instalación de elementos, se deja abierta la posibilidad de diseñar y construir un robot híbrido en un proyecto posterior. A pesar de sus desventajas, se obtuvo en el análisis que era la segunda alternativa más viable para el desarrollo de la misión de inspección.

Se deja también abierta la posibilidad para construir en el futuro aviones con una mayor autonomía, potencia y/o techo de operación, para el desarrollo de misiones más largas o la inspección de líneas por encima de los 10000 pies sobre el nivel del mar.

BIBLIOGRAFÍA

Frutiger, D., Bongard J., Iida F. (2002). Iterative Product Engineering: Evolutionary Robot Design. Proceedings of the Fifth International Conference on Climbing and Walking Robots, 619–629.

Campos, M., Bracarense, A., Pereira, G. (2002). A mobile manipulator for installation and removal of aircraft warning spheres on aerial power transmission lines. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 3559–3564.

Montambault, S., Cote, L., StLouis, M. (2000). Preliminary results on the development of a teleoperated compact trolley for live-line working. Proceedings IEEE International Conference on transmission, distribution, construction, and live line maintenance, 21–27.

Sawada, J., Kusumoto, K., et al. (1991). A mobile robot for inspection of power transmission lines. IEEE Transactions on Power Delivery, 6, 309–315.

Yamaha Motor (2004). Unmanned helicopters, RMAX Type II G. On line: <http://www.yamaha-motor.co.jp/global/business/sky/>.

Hokkaido University (2004). AFO Project. On line: http://ses3.complex.eng.hokudai.ac.jp/afo/index_e.html.

Flir Systems (2005). Airborne imaging products. On line: <http://www.flir.com/imaging/Airborne/Products/>.

Iridium (2005). Products and services. On line: http://www.iridium.com/product/iri_product-home.asp.

Micro hard systems (2004). Professional OEM wireless modules. On line: http://www.microhardcorp.com/products_oem.htm

Zanzottera engines (2005). 498ia injection engine with alternator. On line: <http://www.zanzotteraengines.com/498ai.htm>

Halter (2005). UAV propellers. On line: http://www.uav-propellers.com/html/armee/index_fr.htm

Volz Servos (2005). On line: <http://www.volz-servos.com/english/english.html>

Artex (2005). C406 Series. On line: <http://www.artex.net/c406.html>

Butler Parachute Systems Group INC (2005). On line: <http://www.butlerparachutes.com/>

E.E.T. N° 4, I Brigada Aérea - El Palomar - Buenos Aires (2005). Tren de aterrizaje. On line: http://www.oni.escuelas.edu.ar/2003/Buenos_Aires/62/tecnolog/tren.htm

Raymer, Daniel P (1999). Aircraft design: a conceptual approach, 3rd edition. Reston (VA), USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics. 253 p.

RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS

A los ingenieros mecánicos Nicolás Ariza y Juan Guillermo Arboleda por su invaluable aporte al diseño conceptual aeronáutico del UAV. Al estudiante Elkin Taborda por su fundamental participación en el diseño básico del prototipo. Y a los grupos de investigación y a la Facultad de Ingeniería Aeronáutica que participaron en el proyecto con el diseño y selección de los diferentes subsistemas.