

Desarrollo de un sistema experto para ayudar a la verificación del sistema "TACAN"



EXPERT SYSTEM DEVELOPMENT TO ASSIST ON THE VERIFICATION OF "TACAN" SYSTEM PERFORMANCE

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5756> | Recibido: 18/02/2013 • Aceptado: 15/09/2013



Xosé Manuel Vilar-Martínez, Juan Aurelio Montero-Sousa, José Luis Calvo-Rolle, José Luis Casteleiro-Roca

UNIVERSIDAD DE LA CORUÑA. Dpto. de Ingeniería Industrial. Avda. 19 de febrero, s/n - 15495 Ferrol (A Coruña). Tfno: +34 981 337400. x.vilar@udc.es

RESUMEN

Los sistemas de navegación aérea implantados hasta la actualidad, tanto en el ámbito militar como en el civil, están basados en el sistema TACAN o alguna de sus variantes. Desde sus primeras versiones, ha sido desarrollado y mejorado en profundidad. Sin embargo, pese a su sencillez de manejo, ha sido y sigue siendo un sistema extremadamente difícil de entender, tanto en su funcionamiento como en su verificación.

El presente trabajo muestra un sistema experto basado en reglas, desarrollado con el objetivo de llevar a cabo operaciones de verificación de funcionamiento y formación en el sistema TACAN.

El modelo se desarrolla con el fin de alcanzar importantes avances en el diagnóstico de fallos, reducción de tiempos en tareas de mantenimiento, y tratar de eliminar, o, en su defecto, minimizar, errores.

Se ha verificado la eficacia del modelo en varias tareas para las cuales ha sido desarrollado. Los resultados han sido altamente satisfactorios en términos de reducción de tiempos, eficacia y acogida por operadores júnior en fase de formación.

Palabras clave: TACAN, sistemas de navegación aérea, transpondedor, sistema experto, modelo de conocimiento, verificación de funcionamiento, mantenimiento de equipos electrónicos.

ABSTRACT

• The air navigation systems implemented to date, both in military and civilian, are based on the TACAN system or some variant. Since the first release, it has been deeply developed and improved. However, despite it is easy to use, it has been and remains difficult to understand, both in performance and in verification terms. The aim of this research is to expose the developed Expert System to test the performance of TACAN system and for training on the verification of it.

The model has been developed to achieve improvements on: fault detection, maintenance time reduction, and remove or minimize the mistakes on verification tasks.

The efficiency of the model has been verified on several verification tasks. The achieved results have been very satisfactory in time reduction, efficiency and the acceptance by junior operators undergoing training.

• **Keywords:** TACAN, navigation systems, transponder, expert systems, knowledge model, fault detection, maintenance of electronic equipment.

1. INTRODUCCIÓN

Desde su primera puesta en funcionamiento en 1949 [1], y luego durante el desarrollo de posteriores versiones o variantes, el sistema TACAN (*TACTical Air Navigation*) ha sido la tecnología más empleada para la navegación aérea hasta nuestros días [2].

Son múltiples las investigaciones llevadas a cabo sobre el tema, como por ejemplo [3-11]. La tecnología del sistema no ha sufrido grandes evoluciones desde sus inicios y, a día de hoy, sigue siendo difícilmente sustituible. Destacar, además, que no se trata de un sistema trivial y de fácil asimilación para operadores que han de realizar verificación de funcionamiento sobre él [1, 2]. Por ejemplo, para realizar la comprobación de la transmisión de una señal concreta, no es suficiente con comprobar si es correcta, su ubicación temporal depende de otras señales que tienen que transmitirse previa y posteriormente, con lo que este tipo de trabajos se convierten en tediosos y complejos. En este sentido, además, es necesario disponer de personal técnico experimentado y con amplios conocimientos para poder realizar tareas de revisión, previas a las certificaciones periódicas del sistema.

Debido a la dificultad en esta comprobación del funcionamiento del sistema TACAN, sería de gran utilidad obtener un modelo que cumpla con los requerimientos de los usuarios dedicados a esta labor. Esta es la razón por la que en este trabajo se presenta un novedoso método basado en reglas para este fin. Se ha creado un sistema experto con la finalidad de poder asistir al personal técnico del sistema TACAN. El modelo también puede ser usado con fines de formación y adiestramiento.

Los sistemas expertos, pertenecientes al ámbito de la ingeniería del conocimiento, son modelos basados en el conocimiento de personas con amplia experiencia en un área concreta [12, 13]. Se extraen las reglas para realizar una tarea, y se organizan según su eficiencia [12]. Con esta metodología, la implementación del sistema emula el comportamiento de un experto en un determinado campo de aplicación [12, 14], siendo uno de los métodos más empleados tanto en investigación como en operación [14].

En el ámbito industrial moderno, cada vez se encuentran más sistemas en zonas de difícil acceso donde se requieren realizar inspecciones y mantenimientos. Además, debido a la complejidad de algunas labores de rescate y supervisión, los investigadores apuntan a que una posible solución para estos problemas son los vehículos aéreos [15], ya sean tripulados o no. Ejemplos de lo expuesto pueden ser: mantenimientos en líneas de transporte de energía eléctrica (Figura 1), detección de focos de incendio en grandes extensiones, labores de rescate y aprovisionamiento en catástrofes, etc.

Debido a este aumento en el uso de vehículos aéreos, se hace necesario disponer de sistemas de posicionamiento y guiado cada vez más fiables y precisos. En el ámbito de la aviación, sin tener en cuenta los sistemas de posicionamiento por satélite, el sistema TACAN es uno de los pocos que proporciona información a los vehículos aéreos sobre su posición relativa con respecto a un punto geográfico concreto.



Fig. 1: Mantenimiento de aisladores de líneas eléctricas en carga

Este documento se encuentra estructurado de la siguiente manera: tras la presente introducción, se expondrá una reseña histórica donde se analizará brevemente la evolución del sistema desde sus inicios y el motivo de su desarrollo; seguidamente, se mostrará el funcionamiento básico del sistema TACAN, describiendo las dos principales informaciones de interés que proporciona; a saber: la distancia y el rumbo a seguir por un receptor para llegar al emisor. Una vez explicado el funcionamiento, se pasarán a exponer los Sistemas Expertos, sus ventajas de funcionamiento y el procedimiento genérico para su obtención. Posteriormente, se deducirán las señales

más importantes que servirán para crear el modelo de verificación del sistema, así como su operación para su correcto funcionamiento. A continuación, se expondrá brevemente el funcionamiento del modelo obtenido, pasando a mostrar después una demostración de la eficacia del modelo. El trabajo finaliza con la presentación de las conclusiones y el enunciado de posibles trabajos futuros a desarrollar.

2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

En 1903 los hermanos Wright realizaron el que se considera primer vuelo de un aparato con motor. Se trató de vuelo muy corto, en el que se utilizó una catapulta para impulsar el avión [16]. Después de este primer vuelo, el desarrollo de la aviación fue lento. En la primera década del siglo XX, los aviones eran más bien escasos y los desplazamientos eran cortos, intentando no perder el contacto visual con el punto de despegue. Cuando los pilotos se aventuraban a alejarse de los campos de aterrizaje se orientaban siguiendo las carreteras o las líneas férreas; solían utilizarse mapas y brújulas, aunque pronto se descubrió que serían necesarios mapas especiales que contuvieran información adicional (campos de aterrizaje, cotas de altura del terreno, etc.) para que pudieran ser utilizados por los pilotos [17]. La Primera Guerra Mundial amplió el campo de aplicación de la aviación, extendiéndola a un uso militar.

El uso comercial de los aviones comenzó con su utilización por los servicios postales, sobre todo en países con una enorme extensión de territorio como es el caso de Estados Unidos. Los aeropuertos eran escasos y estaban a gran distancia. La ayuda que se podía prestar desde tierra era prácticamente nula y muchas veces las condiciones meteorológicas impedían la navegación o causaban accidentes. En principio se estableció una primera línea aérea para el transporte de correo entre Washington y Nueva York, pero se advirtió que era deficitaria y que la verdadera ventaja comparativa del correo aéreo, en relación con otros medios de transporte como el ferrocarril, estaba en el correo de larga distancia.

La *U.S. Post Office* decidió probar un servicio transcontinental de correo aéreo utilizando la ruta Nueva York-San Francisco; en 1920, para este servicio, se utilizaron 15 campos de aterrizajes. Los vuelos se realizaban durante el día; por la noche las sacas de correo se trasladaban en tren. Ser piloto del correo aéreo era una profesión de riesgo; en nueve años de servicio se produjeron 6500 aterrizajes forzados. Se volaba en biplanos que no tenían cabina para proteger al piloto y las inclemencias meteorológicas, sobre todo el frío, hacían mella en la salud [18].

A partir de 1926 el gobierno estadounidense tomó cartas en el asunto. Se instaló un sistema de faros con luces intermitentes para que los pilotos tuvieran una orientación luminosa a lo largo de las rutas aéreas. En unas torres se instalaron bombillas cuyo haz de luz se reflejaba en un espejo parabólico, que giraba a una velocidad de 6 revoluciones por minuto. Este sistema permitía volar durante las noches guiados por los destellos de luz. Pero seguía persistiendo el problema de guiarse cuando había escasa visibilidad [18].

El Departamento de Correos realizó experimentos para

instalar equipo en sus aviones. El *Federal Telecommunication Laboratories* también realizó trabajos para desarrollar sistemas de radio-navegación [19]. Se desarrollaron balizas de radio que emitían en la banda de 190 a 535 kHz (LF, baja frecuencia). Estas balizas, situadas aproximadamente cada 200 millas, emitían dos señales en código Morse, A (•-) y N (-•), que se fusionaban cuando el avión seguía el rumbo correcto, pero cuando se producía una desviación, se podría oír la señal A o N, según el rumbo hacia donde se hubiese desviado [18].

En 1927 ya funcionaban faros luminosos situados en diferentes puntos de Estados Unidos y un total de 17 radiofaros de baja y media frecuencia (LF & MF). En 1929 existían 89 radiobalizas instaladas en las rutas aéreas. Las comunicaciones de radio entre tierra-aire eran generalmente sólo en un sentido y en código hasta 1930, época en que los pilotos pudieron enviar mensajes radiotelefónicos entre la cabina del avión y las estaciones terrestres que permitieran orientar a los pilotos [20].

Otro avance en los sistemas de navegación aérea se produjo con la utilización del radiogoniómetro, que se basa en la utilización de una antena móvil que se orienta buscando en el horizonte una señal. Este sistema requiere la emisión de una fuente de ondas electromagnética (EEM) con un transmisor, denominado NDB (*Non Directional Beacon*) y un receptor en la cabina del avión, denominado ADF (*Automatic Directional Finder*) que de forma automática es capaz de estimar el ángulo de procedencia de las ondas electromagnéticas [21]. En definitiva, las antenas pueden emitir y recibir señales con cualquier orientación, pero emiten o reciben las señales con mayor intensidad cuando se orienta de una forma determinada [22].

En la década de los 50 se desarrolla el VOR (*VHF Omnidirectional Radio Range*). La señal emitida por la antena VOR contiene tres datos diferentes. Uno es el identificador de la estación emisora en código Morse; otro es el radial, o rumbo entre el receptor y el emisor, que se calcula a través de una señal giratoria [23]; y el tercero indica la distancia a la estación. TACAN es la denominación de la versión militar [24].

La *U.S. Navy* tenía problemas específicos relativos a la orientación de dos objetos que están en movimiento, un avión y un barco. Las primeras experiencias con los antecedentes del TACAN se realizaron en el buque Mississippi y posteriormente en Krause [24]. La versión civil y la versión militar comparten elementos comunes, pero, como es lógico, manteniendo en secreto los desarrollos de la parte militar [25].

3. FUNCIONAMIENTO DE UN SISTEMA TACAN

Para ampliar información sobre el funcionamiento del sistema TACAN pueden acceder al vínculo:

http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/5756_1.pdf



4. SISTEMAS EXPERTOS – MODELOS BASADOS EN REGLAS

En general, se puede decir que la ingeniería del conocimiento es la disciplina que permite construir sistemas inteligentes mediante la deducción de conocimientos [26]. Tiene como procesos centrales la adquisición, representación, manipulación y validación de este conocimiento [27]. Los sistemas basados en conocimiento, se pueden definir como sistemas *software*, que contienen una gran cantidad de conocimiento e incluyen métodos adecuados para explotarlo. Desde este punto de vista, aparecen los sistemas expertos [28].

Un sistema experto se suele reservar para aquellos sistemas basados en conocimiento que se relacionen más directamente con el conocimiento utilizado por expertos humanos [29], en contraposición con aquellos en los que el conocimiento se extrae de los libros o de personas no expertas (reglas comunes). Una de las ventajas que tienen estos sistemas es que son capaces de “capturar” experiencias y comportamientos escasos o específicos, pudiendo usar este conocimiento en diversas situaciones y lugares, sin necesidad de que el experto humano se encuentre físicamente allí [30].

4.1. VENTAJAS DE LOS SISTEMAS EXPERTOS

El desarrollo de sistemas expertos es aconsejable para ciertos dominios, e (incluso) imprescindible en otros. Algunas de las ventajas más importantes que ofrecen los sistemas expertos son las que se enumeran a continuación (relacionadas directamente con los sistemas *software* basados en conocimiento) [31]:

- Permanencia. A diferencia de un humano, un sistema experto no envejece. Por tanto, carece de pérdida de facultades y de desaparición del propio sistema con el paso de los años.
- Duplicación. Una vez programado el sistema, es posible duplicarlo las veces que sea necesario. Este hecho repercute directamente en una reducción de costes.
- Rapidez. Un sistema experto podría obtener información de una base de datos, realizar cálculos numéricos y presentar un resultado adecuado más rápidamente que el propio experto humano del que se ha adquirido el conocimiento.
- Bajo costo. El coste inicial del sistema puede ser elevado, pero, como se mencionó, gracias a la capacidad de duplicación, el coste final debería ser bajo.
- Entornos peligrosos. Un sistema experto podría trabajar en entornos peligrosos o dañinos para el ser humano. Los ejemplos más notorios los podríamos encontrar en manipulación de explosivos, trabajos en entornos radioactivos, etc.
- Fiabilidad. Estos sistemas no se ven afectados por condiciones externas. Un experto humano podría tomar decisiones motivadas por el estrés o por el estado de ánimo, cosa que no sucedería con un sistema experto.
- Explicación del razonamiento. A la hora de “introducir” el conocimiento en un sistema experto, se requiere de un estudio exhaustivo del problema concreto. Esto permite tener justificadas perfectamente las respuestas del sistema en cada momento, ya que no se deberían de dar “por

casualidad". Esta cualidad, también puede ser empleada para formar a personal no experto en el ámbito de aplicación, ya que todo el conocimiento del sistema estaría recogido en el sistema experto.

4.2. CONTEXTUALIZACIÓN DEL CONOCIMIENTO

El conocimiento es una mezcla de experiencia, valores, información y "saber hacer", que sirve como marco para la incorporación de nuevas experiencias e información [32], se origina y aplica en la mente de los expertos.

En las organizaciones, el conocimiento no sólo se encuentra dentro de documentos o almacenes de datos, sino que también está en rutinas organizativas, procesos, prácticas y normas. El conocimiento es intuitivo y difícil de captar en palabras o de entender plenamente de forma lógica, y existe dentro de las personas como parte de la complejidad humana. El conocimiento es específico de la materia y del dominio [33]. El conocimiento es un tipo especial de información que se puede

definir como "información de la información". Como ejemplo de esto se puede tomar un caso clínico en el que un individuo late 160 pulsaciones por minuto; a priori, parecería una información preocupante, pero no lo sería si estuviésemos hablando de un feto, en cuyo caso estaría dentro de la normalidad.

Resulta difícil definir el concepto de conocimiento, pero es más aún el representarlo. Se hace necesario que el conocimiento adquirido de una materia deba ser organizado, y preparado, para su utilización computacional en un sistema. En el desarrollo de un sistema experto, primero se intenta ver el problema desde el punto de vista del usuario, y después se cambiaría la perspectiva para verlo desde el punto de vista del sistema [34]. Se pretende, por tanto, pasar del dominio de la aplicación al de la implementación.

Para realizar esta transformación se debe llevar a cabo una actividad de modelado del sistema que se divide genéricamente en dos partes [35]:

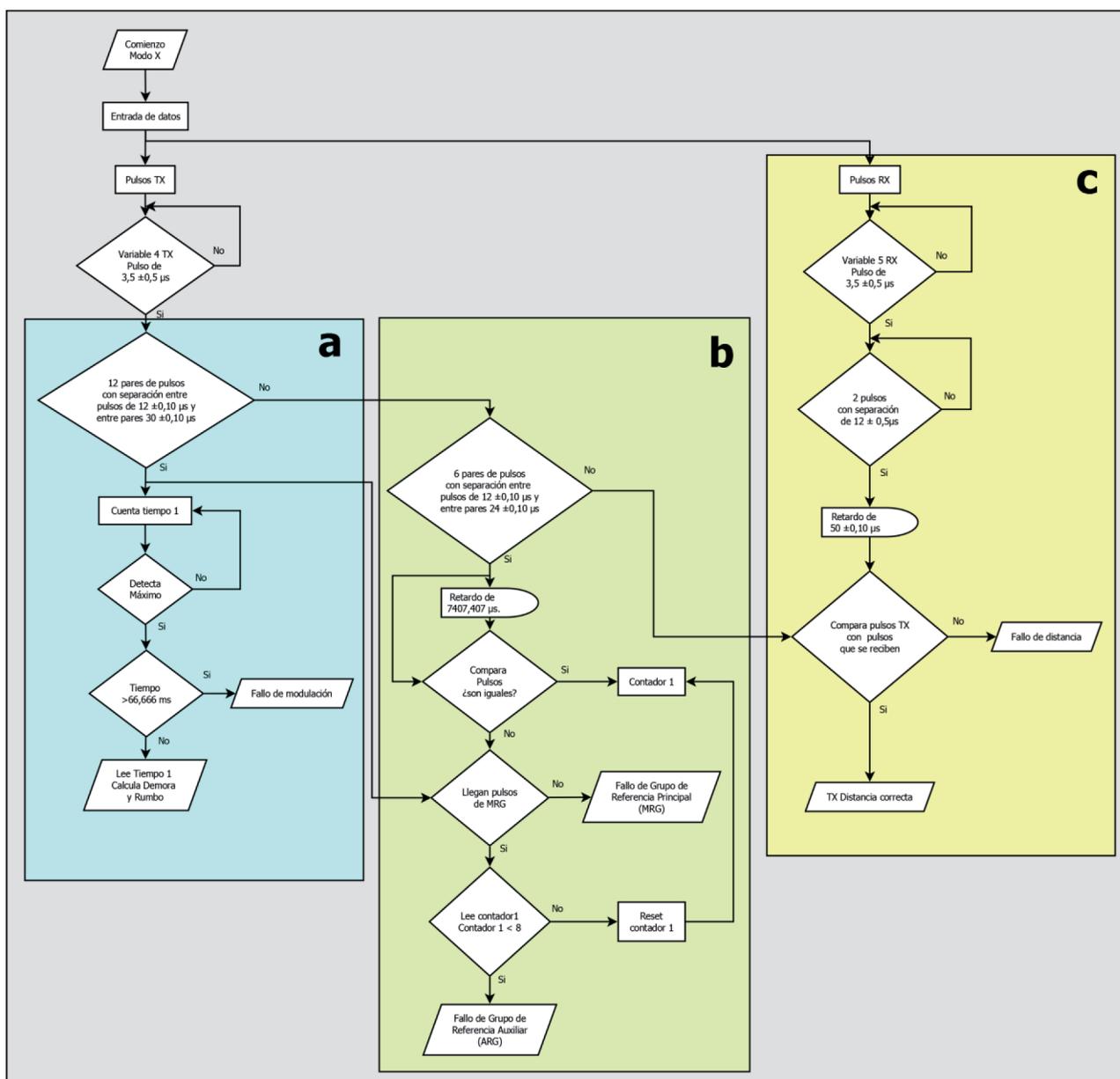


Fig. 12: Flujograma de funcionamiento del sistema TACAN en Modo X

- La primera sería una especificación de lo que debiera hacer el sistema. Se determinaría si el sistema resulta válido, y se adecúa a las necesidades del usuario. Esta primera parte se conoce como modelado conceptual. En ella se representa la estructura de los conceptos identificados en la fase de adquisición del conocimiento y los métodos de resolución empleados por expertos humanos y otras fuentes.
- La segunda parte de modelado determinaría que el producto *software* fuese correcto y permitiera representar todo el conocimiento. También comprobaría si el sistema tiene la capacidad necesaria para realizar los procesos de inferencia para dar soluciones. Esta parte es la denominada modelado formal.

5. MODELO BASADO EN REGLAS DEL FUNCIONAMIENTO DE UN SISTEMA TACAN

Se describe en este apartado el funcionamiento del modelo implementado para la verificación del sistema TACAN. Se tendría como entrada al mismo, los datos de salida de un emisor TACAN (la radiobaliza), y se analizarían, según correspondiera, para extraer de ellos los datos que darían lugar tanto a la demora como a la distancia. Una vez comprobado que las salidas del modelo corresponden a los datos teóricos, se debería enviar el sistema a verificar, y se daría por concluida la tarea.

Para analizar los datos se debe comprender la relación que hay entre las diferentes señales del sistema. El flujograma que se muestra en la Figura 12 es el usado para el funcionamiento del sistema en Modo X. Para el Modo Y sería similar, con las variaciones que la diferencia de modo implicaran, básicamente, el número y las temporizaciones entre pulsos. De esta manera se entenderá como se secuencian los datos y se “descodifica” la información contenida en los mismos (demora, distancia).

Para llevar a cabo la verificación se capturarían los datos que se transmiten por la antena. En el caso que nos ocupa, esta captura se realiza mediante un osciloscopio DSO 6104A de Agilent, utilizando una frecuencia de muestreo de 500 kHz. Se han adquirido los datos en modo “csv”, para, posteriormente, ser tratados mediante *MatLab*[®], por medio de *scripts* (programas de *MatLab*[®]).

Las comprobaciones anteriores al uso del sistema experto desarrollado se realizaban con un osciloscopio Tektronix TDS 3034B. Este equipo no dispone de capacidad de captura de datos, con lo que en la actualidad es usado sólo para medidas puntuales, pero no para el uso en el modelo desarrollado.

Los datos que se adquieren pueden observarse en la figura 13. Son los correspondientes a los pulsos de envío del MRG (primera traza, amarilla), ARG (segunda traza, verde), y todos los pulsos transmitidos, que serán los analizados realmente por el sistema experto (tercera traza, magenta). Las dos primeras trazas corresponden a señales internas del sistema, que indican los instantes de transmisión del MRG y del ARG en cada caso; pero no son señales transmitidas propiamente dichas.

En el flujograma se distinguen dos partes bien diferencia-

das para la verificación. La primera, que es la determinación de la demora, se muestra en la parte izquierda de la Figura 12, y corresponde a los recuadros “a” (la parte del MRG) y “b” (la parte del ARG); la segunda, que representa la medición de la distancia, se puede apreciar en la parte derecha (recuadro “c”). En la parte del flujograma que queda fuera de los recuadros mencionados, se comprueba que los pulsos capturados son correctos. A continuación se expondrán cada uno de las partes generales del flujograma:

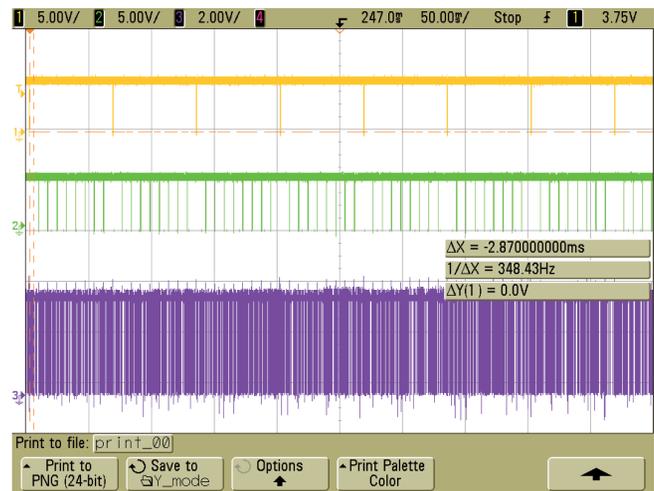


Fig. 13: Datos capturados por el osciloscopio para la verificación del Modo Y

La verificación comenzaría con la introducción de los datos capturados del sistema del cual se quiere comprobar el funcionamiento. Posteriormente, se acometerían acciones de mantenimiento correctivo, si son necesarias.

La primera comprobación se centra en la medición del ancho de cada pulso transmitido. El valor medido deberá ser de $3.5 \mu s \pm 0.5 \mu s$. Si el pulso analizado se encuentra dentro de la tolerancia, se comenzará la búsqueda de la trama (grupo de pulsos) correspondiente al MRG (recuadro “a” de la figura 12).

El siguiente paso en el flujograma es la localización del MRG. Habrá que localizar un grupo de 12 pares de pulsos, con una separación entre pulsos de $12 \mu s \pm 0.5 \mu s$ (Figura 14), y una separación entre pares de $30 \mu s \pm 0.1 \mu s$. En la Figura 15 puede verse una trama capturada del MRG.

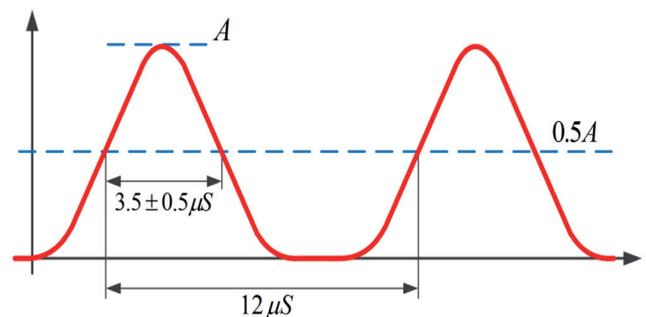


Fig. 14: Ancho teórico y separación de los pulsos del MRG

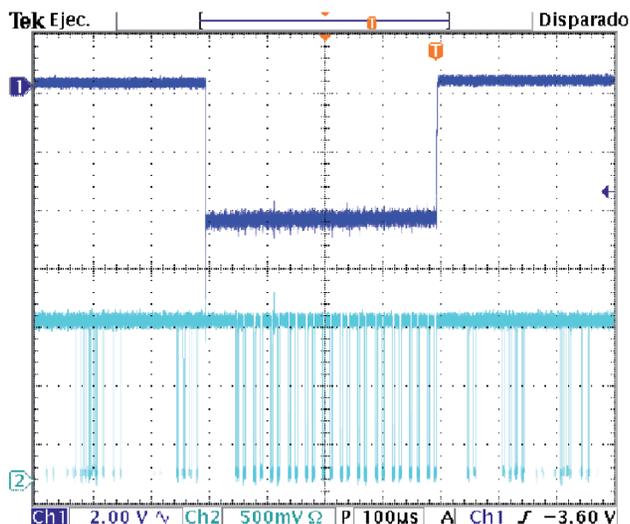


Fig. 15: Localización del Grupo de Referencia Principal

Si en la secuencia de pulsos se encuentra el MRG, se activa el contador 1, que se usará para contar el tiempo que transcurre desde la localización del MRG hasta la detección del máximo de la señal modulada. Si este tiempo sobrepasa los 66.666 ms (periodo de repetición de la secuencia de transmisión, 15 Hz), puede ocurrir que la modulación no se transmita de forma correcta, o que el sistema tenga una avería en la detección del máximo. Si se determina el tiempo entre el MRG y el máximo de modulación (ejemplos en las Figuras 6.a, 6.b y 7.a), se podrá calcular el radial en la que se encuentra el TACAN con respecto a la aeronave receptora.

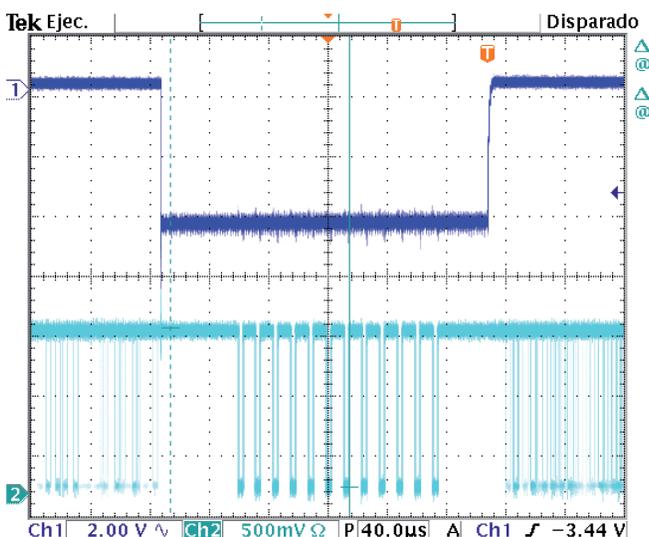


Fig. 16: Localización del Grupo de Referencia Auxiliar

Si los pulsos analizados no forman parte del MRG, se desvía el flujo de datos en el programa para localizar el ARG (recuadro "b" de la Figura 12). Se transmiten 8 ARGs y un MRG

en cada ciclo. Este ARG es un grupo de 6 pares de pulsos, cuya separación entre pulsos es de $12 \mu s \pm 0,5 \mu s$ y la separación entre pares es de $24 \mu s \pm 0,1 \mu s$ (Figura 16). Una vez detectado el primer grupo de pulsos correspondiente al ARG, el programa esperará $7407,407 \mu s$ (separación entre ARGs, 135 Hz) y comprobará si el siguiente grupo de pulsos es igual que el anterior.

Si los grupos de pulsos son iguales, un contador incrementará su valor para llevar la cuenta de los ARGs recibidos; en caso contrario, se comprobará que llega el MRG. Si a su vez esta comparación es negativa, se activará el fallo de MRG. Si por el contrario, la comparación es buena, la generación del MRG, con respecto a los ARGs, se realiza correctamente.

Además de ser buena la comparación, se leerá el número de incrementos en el contador de ARGs recibidos. Si el valor del contador es 7, el ARG está funcionando correctamente y se reseteará el contador para iniciar otro nuevo ciclo. Si el contador indicase un número diferente, se estaría generando mal el ARG.

Si los pulsos son correctamente detectados (ancho de pulso correcto), pero no forman parte del MRG, ni del ARG, el flujograma los "desviará" hacia la comparación de pulsos con la de determinación de la distancia DME (recuadro "c").

En la determinación de la distancia, hay que tener en cuenta que el sistema recibe la interrogación de la aeronave, y, posteriormente, envía la respuesta para que ésta pueda determinar la distancia DME. Los pulsos DME que recibe la baliza, se tienen que retrasar $50 \mu s$ (en el modo X), antes de volver a transmitirlos con la misma secuencia.

Los pulsos DME son pares de pulsos separados $12 \mu s \pm 0,5 \mu s$ (Figura 17), que a su vez se separan de otros de forma aleatoria (Figura 5). En el sistema experto, lo que se comprueba es que los pulsos transmitidos para este propósito son los mismos que se recibieron después de introducir el retardo correspondiente.

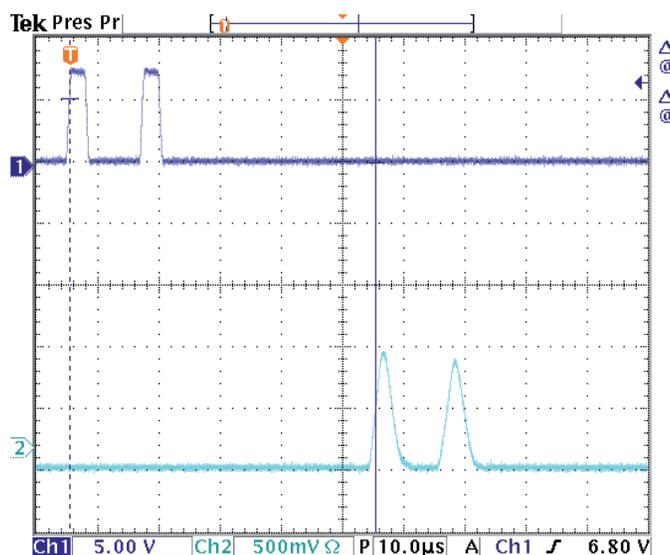


Fig. 17: Retardo introducido en los pulsos DME con respecto a su recepción

Todos los demás pulsos detectados, que no correspondan ni al MRG, ni al ARG, ni a los pulsos de determinación de la distancia, son pulsos de relleno (*squitter*). Estos pulsos se usan para mantener estable el control automático de ganancia.

El control automático de ganancia, aumenta la misma para recibir siempre la información con el mismo nivel de señal. Si no se recibiese nada, el sistema aumentaría la ganancia en automático, y, al recibir información de nuevo, el receptor se saturaría momentáneamente hasta ajustar de nuevo el nivel de ganancia adecuado. El envío de pulsos de relleno evita esta situación, así como la posible pérdida de información por saturación en el receptor.

El grupo de identificación de la señal TACAN es una transmisión en código Morse que identifica la radiobaliza que envía la señal. En el flujograma de la Figura 12, no aparece el tratamiento de esta señal, ya que al ser una señal con una frecuencia de transmisión muy lenta (cada 150 s), la comprobación de su correcta transmisión se realiza con un modelo diferente al contemplado en este artículo.

La información completa que transmite el sistema TACAN por orden de precedencia es:

- Grupo de Referencia Principal (MRG). Se emite cada 66.6 ms.
- Grupo de Referencia Auxiliar (ARG). Se emite cada 7.4 ms, excepto cuando se emite el MRG.



Fig. 18: Sistema TACAN y adquisición de la señal transmitida

```

% Determina el ancho de pulso de los pulsos capturados.
% Fecha: 25/05/2012.
% Definición de variables:
% Datos: matriz de datos.
% B: matriz con el tamaño de la matriz Datos.
% numero_filas: número de filas de la matriz de datos.
% n: contador de filas.
% a0: valor de tensión en el tiempo t0.
% a1: valor de tensión en el tiempo t1.
% V: Vector con la temporización de los pulsos detectados.
%-----
%
clear;
m=0; % Inicializo la variable.
Datos=csvread('/home/usuario/Prueba_datos/X-mode_20120402.csv'); % Se lee
% el fichero de datos y se almacena en la variable Datos.
B=size(Datos); % Matriz con el tamaño de la variable Datos.
numero_filas=B(1,1)-1; % Número de filas de datos.
for n=2:numero_filas;
    a0=Datos(n,4); % Nivel del pulso a0.
    n=n+1;
    a1=Datos(n,4); % Nivel del pulso a1.
    if (a0<2 && a1>3) t0=Datos(n,1); % Detecta el flanco de subida.
    else
        if (a0>2 && a1<3) t1=Datos(n,1); % Detecta el flanco de bajada.
        ta=t1-t0; % Tiempo entre flanco de subida y flanco de bajada.
        m=m+1;
        V(m,:)=ta; % Escribe el vector con el tiempo de los anchos de
            % pulso.
    end
end
end
save('-text','Vector_Columna.txt','V'); % Graba el vector columna V en el
% fichero de texto Vector_Columna.txt.
    
```

Fig. 19: Script para la determinación del ancho de los pulsos capturados

- Respuesta de interrogaciones (DME).
- Squitter (pulsos de relleno).
- Grupo de identificación se emite cada 150 s.

EXPLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO PARA UTILIZAR EL MODELO

Se capturarían las señales del sistema según se ha descrito (Figura 18). Se realizaría el tratamiento de los ficheros de datos para extraer información. Dependiendo del sistema usado para la captura, este tratamiento puede ser más o menos complicado para adaptar el formato a los programas implementados. Una vez comprendida la secuencia de la información, se hace uso de los scripts para comprobar el funcionamiento de las diversas partes del sistema.

Los *scripts* programados realizan al menos las siguientes funciones:

- Se mide el ancho de pulso de todos los pulsos capturados, detectando posibles fallos en la unidad de generación de pulsos.
- Se localiza el MRG y se calcula el porcentaje de modulación de los datos capturados, detectando de esta manera posibles fallos en la generación del MRG, en el sistema de modulación, en la orientación de la antena...
- Se localiza el ARG, detectando fallos en la transmisión del ARG (tanto en forma, número de grupos ARG).
- Se comprueba que la retransmisión de los pulsos DME recibidos es correcta, verificando el sistema de retardo

en el DME y que las temporizaciones aleatorias se respetan.

Teniendo en cuenta los fallos funcionales enumerados, se debería reflejar, para cada sistema TACAN, los posibles componentes de fallo en el propio sistema experto. Particularizando para el caso del TACAN AN/URN-25 (mostrado en la Figura 18), las unidades concretas según los fallos que se encuentre serían:

- Cuando el sistema localiza los fallos en el ancho de pulso, la avería se suele localizar en el "Low Level Modulator", 1A2A12.
- Si el fallo se centra en la generación de MRG o ARG, la avería se suele localizar en el "Coder-Keyer", 1A1A18.
- Si el fallo se localiza en la determinación de la distancia, en el retardo de 50 μ s, la avería se suele localizar en "Time Delay Generator", 1A1A12.
- Puede darse el caso de que la frecuencia del canal de transmisión se encuentre desviada, o que no se genere la frecuencia base. Si esto ocurre la avería se suele centrar en el sintetizador de frecuencia "Frequency Synthesizer", 1A1A16.
- Si se detecta un fallo de modulación, con lo que la demora no podría determinarse, el fallo se suele centrar en la antena "Antenna AS-3240/URN".

Se muestra en la Figura 19 uno de los scripts implementados, concretamente el que corresponde a la medición del ancho de pulso.

Tarea	Acciones de verificación	Operador Sénior	Operador Junior	Junior asistido
Comprobación de transmisión del código de identificación	Comprobar que se transmite correctamente de forma cíclica cada 150 s.	17 min.	30 min.	20 min.
Comprobación de la separación de los pulsos DME, y el tiempo de retardo de la respuesta (figura 20.a)	El pulso debe medirse al 50 % del nivel de máxima amplitud. Su forma debe ser gaussiana sin zonas de compresión.	10 min.	20 min.	12 min.
Localización del MRG (figura 20.b)	Comprobar que los pulsos coinciden con el modo configurado.	15 min.	30 min.	18 min.
Localización del ARG	Comprobar que los pulsos coinciden con el modo configurado.	15 min.	30 min.	18 min.
Localización del máximo de la señal	Se localiza el máximo y el mínimo, a partir de los cuales se determinará el porcentaje de modulación.	7 min.	20 min.	10 min.
Comprobación de la distancia DME	Verificación de que la separación aleatoria entre pares de pulsos se mantiene en la retransmisión de la respuesta.	10 min.	20 min.	12 min.
Pulsos de relleno – Squitter	Medida de los pulsos (aprox. 6800 pulsos por segundo).	15 min.	30 min.	20 min.

Tabla 1: Comparativa de tiempos en trabajos de mantenimiento del TACAN

6. VERIFICACIÓN EMPÍRICA DE LA PROPUESTA

Para la verificación del funcionamiento del sistema experto propuesto, se ha realizado una medición de tiempos en tareas de verificación de sistemas TACAN instalados en buques.

Las pruebas se han realizado un total de 5 veces cada una para los distintos supuestos:

- Tiempo de verificación por personal sénior.
- Tiempo de verificación por personal junior adiestrados

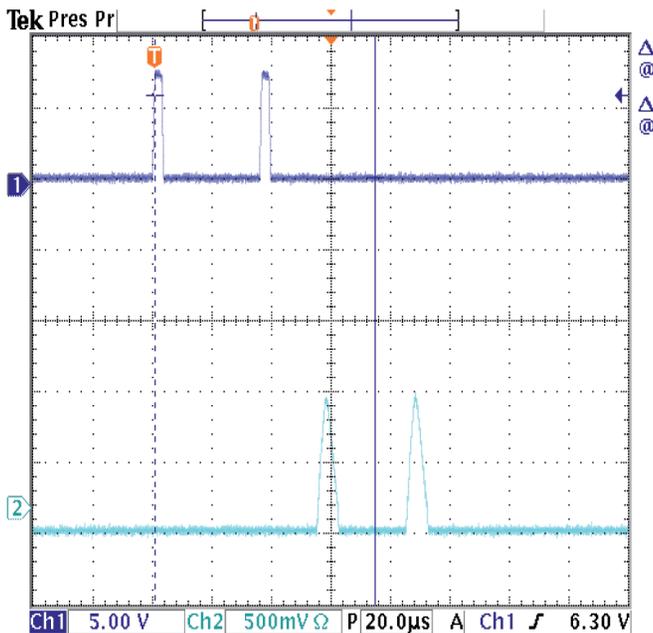


Fig. 20.a: Comprobación del tiempo de retardo en la respuesta del DME

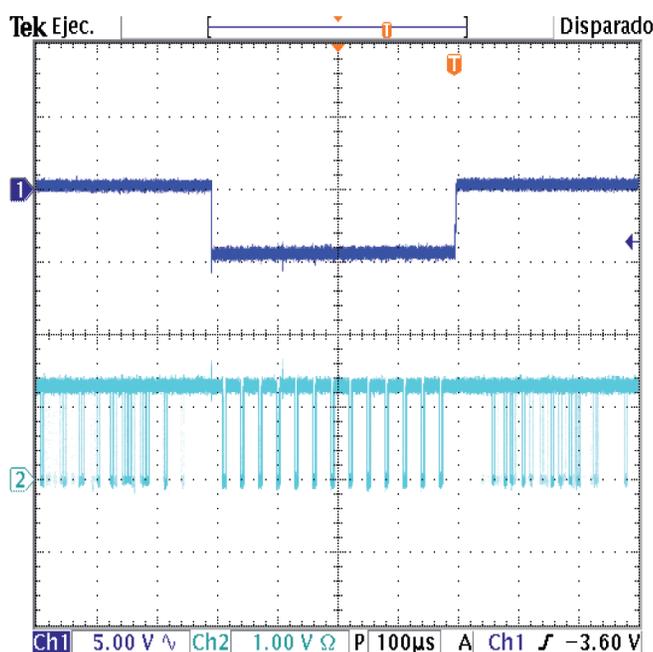


Fig. 20.b: Comprobación del espectro de radiofrecuencia del MRG

pero sin experiencia.

- Tiempo de verificación por personal junior adiestrados, sin experiencia, pero asistidos por el sistema experto.

En la Tabla 1 se muestran los resultados. La primera columna muestra la definición de la tarea, la segunda las acciones de verificación y en las tres siguientes se indican los tiempos medios empleados por los tres tipos de usuarios mencionados.

Tal y como se puede observar al comparar los tiempos medios de los operadores junior, éstos mejoran de forma muy significativa con la asistencia del sistema experto. En ningún caso los tiempos son mejores a los conseguidos por operadores sénior, pero se acercan a ellos de forma considerable. Se ha comprobado que con este método se reduce la incertidumbre al realizar la verificación. Destacar, además, que en la fase de formación sobre el sistema, la curva de aprendizaje del personal a adiestrar es más rápida con la asistencia del esquema del sistema experto propuesto.

7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Con los programas descritos en este artículo, se ha podido comprobar experimentalmente el funcionamiento de diversos sistemas TACAN. La herramienta desarrollada es totalmente funcional y efectiva a la hora de verificar el sistema, y es el método usado por algunos técnicos especialistas.

A la hora de realizar las verificaciones, los técnicos solían encontrarse con el problema de que no se disponía de receptores válidos para la verificación de la transmisión. Con el método descrito en este artículo, no es necesario el disponer de receptores funcionales, siendo únicamente necesaria la señal de salida, junto con el sistema experto desarrollado. Esto permite que la verificación se pueda hacer en cualquier momento, y sin interrupción del servicio, capturando la señal en cualquier momento, y procesándola.

Este método es una excelente manera de aprender cómo opera el sistema TACAN, ya que se analiza el funcionamiento de cada una de sus partes de manera independiente. De esta forma, se obtiene una nueva herramienta, tanto para tareas de mantenimiento, como de formación en este sistema. Tal y como se ha comprobado en la verificación empírica del método, en las tareas de mantenimiento es de gran ayuda al personal que carece de experiencia, reduciendo, además, de forma significativa, el tiempo empleado para la adquisición de los conocimientos necesarios con el fin de obtener el grado sénior para este tipo de tareas. El modelo indica de manera aproximada la causa más probable de fallo cuando la verificación no es satisfactoria.

Como trabajos futuros cabría destacar el desarrollo de otro sistema experto de asistencia para el personal técnico de reparación del sistema TACAN.

El sistema TACAN es muy sencillo en lo que a su uso se refiere, pero sin embargo, como ocurre con muchos sistemas industriales, dicha sencillez va en contraposición de la complejidad interna de las señales. Debido a esta complejidad, y que la tecnología del sistema es antigua (no los equipos), el personal de asistencia del mismo requiere de mucha experiencia para que las reparaciones sean eficientes.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Wikipedia. "Sistema VOR" [en línea]. Disponible en web: <http://es.wikipedia.org/wiki/Usuario:Italcala/sistema_vor> [Consulta: 27 de febrero de 2011]
- [2] Kayton M, Fried WR. *Avionics Navigation Systems*. Editorial: John Wiley & Sons, 2007. ISBN: 978-04-715-4795-2
- [3] Bin Z, We-Kang W. "Research on Accurate Measurement Method of TACAN Azimuth Base don Curve Fitting". En: *WiCom'09. 5th International Conference on Wireless communications, Networking and Mobile computing*, Sep. 2009. p. 1-4 (doi: <http://dx.doi.org/10.1109/WICOM.2009.5302518>)
- [4] Cheng WH, Mar A, Bowers JE et al. "High speed 1.3 μm InGaAsP Fabry-Perot lasers for digital and analog applications". *IEEE Journal of Quantum Electronics*. Jun. 1993. Vol. 29-6 p. 1660-1667. (doi: <http://dx.doi.org/10.1109/3.234418>)
- [5] deFaymoreau E. "Experimental Determination of TACAN Bearing and Distance Accuracy". *IRE Transactions on Aeronautical and Navigational Electronics*. Mar. 1956. Vol. ANE-3-1 p. 33-36. (doi: <http://dx.doi.org/10.1109/TANE3.1956.4201438>)
- [6] Gao J, Fu C, Liu Y et al. "Behavioral modeling and EMC analysis for TACAN system". En: *IEEE 4th International Symposium on Microwave, Antena, Propagation, and EMC Technologies for Wireless Communications (MAPE)*. Nov. 2011. p. 576-579 (doi: <http://dx.doi.org/10.1109/MAPE.2011.6156169>)
- [7] Hadeii M, Ghorbani A, Khorramabad SMN. "Design and simulation of beam forming network for TACAN radar". En: *IEEE International RF and Microwave conference (RFM)*. Dec. 2011. p. 49-53 (doi: <http://dx.doi.org/10.1109/RFM.2011.6168693>)
- [8] Shi Y, Olson DJ, Bechtel JH et al. "Photoinduced molecular alignment relaxation in poled electro-optic polymer thin films". *Applied Physics Letters*. Feb. 1996. Vol. 68-8 p. 1040-1042 (doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.116241>)
- [9] Shi Y, Wang W, Bechtel JH et al. "Fabrication and characterization of high-speed polyurethane-disperse red 19 integrated electrooptic modulators for analog system applications". *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. Jun. 1996. Vol. 2-2 p. 289-299 (doi: <http://dx.doi.org/10.1109/2944.577380>)
- [10] Shi Y, Wang W, Lin W et al. "Double-end crosslinked electro-optic polymer modulators with high optical power handling capability". *Applied Physics Letters*. Mar. 1996. Vol. 70-11 p. 1342-1344 (doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.118574>)
- [11] Cheng WH. "Effect of carrier lifetime on mode partition noise in multimode semiconductor lasers". *IEEE Photonics Technology Letters*. Mar. 1994. Vol. 6-3 p. 355-358 (doi: <http://dx.doi.org/10.1109/68.275487>)
- [12] Cimino MGCA, Lazzerini B, Marcelloni F et al. "An adaptive rule-based approach for managing situation-awareness". *Expert Systems with Applications*. 2012. Vol. 39-12 p. 10796-10811 (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2012.03.014>)
- [13] Hayes-Roth F, Waterman DA, Lenat DB. *Building expert systems*. Editorial: Addison-Wesley, 1983. ISBN: 978-02-011-0686-2
- [14] Hayes-Roth F. "Rule-based systems". *ACM Commun*. Sep. 1985. Vol. 28-9 p. 921-932 (doi: <http://dx.doi.org/10.1145/4284.4286>)
- [15] *Helicopter-Based Live-Line Work: Volume 1: Helicopter Platform Work Between Phases, Final Report*, [Massachusetts], High Voltage Transmission Research Center, 1993. 132 p. Disponible en web: <<http://www.epri.com/search/Pages/results.aspx?k=Helicopter-Based%20Live-Line%20Work%20Volume%201:%20Helicopter%20Platform%20Work%20Between%20Phases,%20Final%20Report>>
- [16] "Historia de la aviación" [en línea]. Disponible en web: <<http://laaviacion.webatu.com/aviacion/historia-de-la-aviacion.htm>> [Consulta: 11 de noviembre de 2012]
- [17] Sviták P. "View back to the history of air navigation services" [en línea]. Disponible en web: <http://www.rlp.cz/generate_page.php?page_id=1182>
- [18] Wood C. "Flight simulator navigation" [en línea]. Disponible en web: <<http://www.navfltsm.addr.com/index.htm>>
- [19] Sandretto PC. "Development of TACAN at Federal Telecommunication Laboratories". En: *Electrical Communication*. Mar. 1956. p. 4-10
- [20] López C. "Historia del tráfico aéreo" [en línea]. Disponible en web: <<http://www.aviacioncivil.com.ve/historia-del-traffic-aereo>> [Consulta: 9 de noviembre de 2012]
- [21] León FG. *Radiogoniometría*. Editorial: Instituto Politécnico Nacional (Dirección de publicaciones), 2007. ISBN: 978-97-036-0435-7
- [22] "Radiogoniómetro" [en línea]. Disponible en web: <<http://www.exordio.com/1939-1945/civilis/telecom/hf-df.html>>
- [23] Wikipedia. "Radiofaro omnidireccional VHF" [en línea]. Disponible en web: <http://es.wikipedia.org/wiki/Radiofaro_omnidireccional_VHF>
- [24] Wikipedia. "Sistema TACAN" [en línea]. Disponible en web: <http://es.wikipedia.org/wiki/Usuario:Italcala/sistema_tacan> [Consulta: 10 de noviembre de 2012]
- [25] Wikipedia. "Tactical air navigation system" [en línea]. Disponible en web: <http://en.wikipedia.org/wiki/Tactical_air_navigation_system> [Consulta: 10 de noviembre de 2012]
- [26] Wikipedia. "Knowledge engineering" [en línea]. Disponible en web: <http://en.wikipedia.org/wiki/Knowledge_engineering> [Consulta: 28 de enero de 2013]
- [27] Prat N, Akoka J, Comyn-Wattiau I. "An MDA approach to knowledge engineering". *Expert Systems with Applications*. 2012. Vol. 39-12 p. 10420-10437 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2012.02.010>)
- [28] Martínez-Muneta M, Juanes-Márquez J, Rodríguez-Villagrà M, et al. "Simulando la inyección de plásticos. Nuevas formas de aprender los procesos". *DYNA Ingeniería e Industria*. 2012. Vol. 87-6 p. 671-678 (doi: <http://dx.doi.org/10.6036/4709>)
- [29] Wikipedia. "Expert system" [en línea]. Disponible en web: <http://en.wikipedia.org/wiki/Expert_system> [Consulta: 28 de enero de 2013]
- [30] Giarratano J, Riley G. *Expert Systems: Principles and Programming*. Editorial: Addison-Wesley, 2004. ISBN: 978-02-011-0686-2
- [31] Calvo-Rolle J, Ferreiro-García R, Alonso-Álvarez A. "Sistema basado en conocimiento para análisis de vibraciones en mantenimiento predictivo". *DYNA*. 2008. Vol. 83-8 p. 484-492
- [32] Chen Y, Hsu CY, Liu L, Yang S. "Constructing a nutrition diagnosis expert system". *Expert Systems with Applications*. 2012. Vol. 39-2 p. 2132-2156 (doi: [10.1016/j.eswa.2011.07.069](http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2011.07.069))
- [33] Wilk T, Wozniak M. "Soft computing methods applied to combination of one-class classifiers". *Neurocomputing*. 2012. Vol. 75-1 p. 185-193 (doi: [10.1016/j.neucom.2011.02.023](http://dx.doi.org/10.1016/j.neucom.2011.02.023))
- [34] Praczyk T, Szymak P. "Decision system for a team of autonomous underwater vehicles - Preliminary report". *Neurocomputing*. 2011. Vol. 74-17 p. 3323-3334 (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.neucom.2011.05.013>)
- [35] López-Fornies I, Bergues-Muro L. «Diseño conceptual de productos. Un enfoque biomimético para la mejora de funciones». *DYNA*. 2012. Vol. 87-1 p. 35-44 (doi: <http://dx.doi.org/10.6036/4313>)