

# El tratamiento digital de señales en el marco de la guerra electrónica

MIGUEL ANGEL GONZALEZ PEREZ,  
Capitán Ingeniero Técnico Aeronáutico

## INTRODUCCION

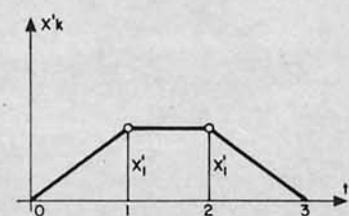
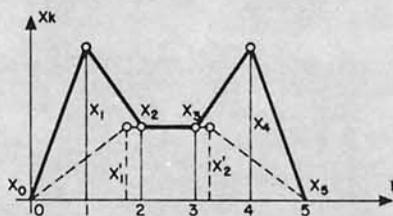
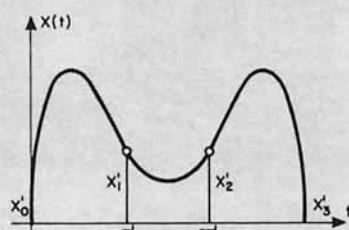
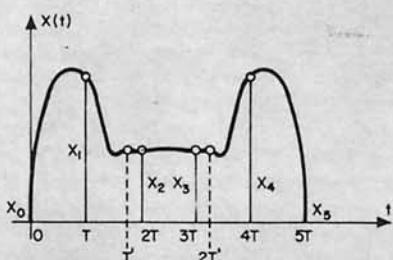
La gran densidad de radares, con sus sistemas C<sup>3</sup>I y de armas asociados, que en la actualidad existe en cualquier escenario bélico, especialmente en una defensa terminal, hace muy difícil la perturbación simultánea de todos los emisores, y es preciso, en todo momento del combate, establecer prioridades de perturbación, atendiendo a la letalidad de las armas, mediante la utilización de perturbadores inteligentes.

Los sistemas inteligentes tienen capacidad para detectar las señales emitidas por los radares enemigos, analizarlas, determinar la letalidad de las armas a ellos asociadas, asignar prioridades de perturbación, e iniciar la activación de los perturbadores. En los sistemas típicos, los receptores se encargan de efectuar un barrido del espectro a fin de interceptar los emisores que pueden constituir una amenaza potencial. Una vez interceptada la señal, el procesador realiza las operaciones necesarias para la extracción de los parámetros del emisor y su posterior comparación con la información previamente almacenada con fines de identificación. Si el emisor constituye una amenaza real, el procesador envía la información extraída al generador de técnicas de ECM (contramedidas electrónicas) para su activación, y generación de la más idónea, capaz de neutralizar la amenaza.

Para hacer frente a las nuevas técnicas de modulación avanzada (chirp agilidad de frecuencia, salto de frecuencia, etc...) que utilizan saltos de hasta 2 GHz, actualmente desarrollados, los sistemas de Guerra Electrónica tienen que disponer de receptores de muy alta probabilidad de interceptación, y si tenemos en cuenta la extremadamente corta duración de los impulsos empleados

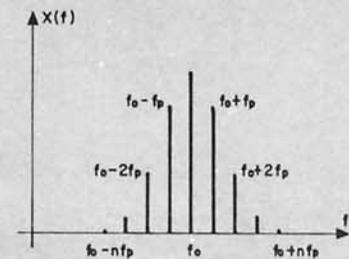
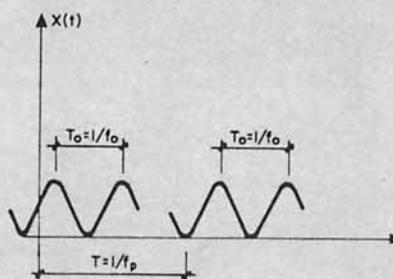
## ANEXO 1 - MUESTREO Y FILTRADO DE SEÑALES

a) Muestreo de una señal compuesta por tres armónicos de frecuencias  $f_0$ ,  $3f_0$  y  $5f_0$  con periodos de muestreo  $T = 1/10f_0$  y  $T' = 1/6f_0$



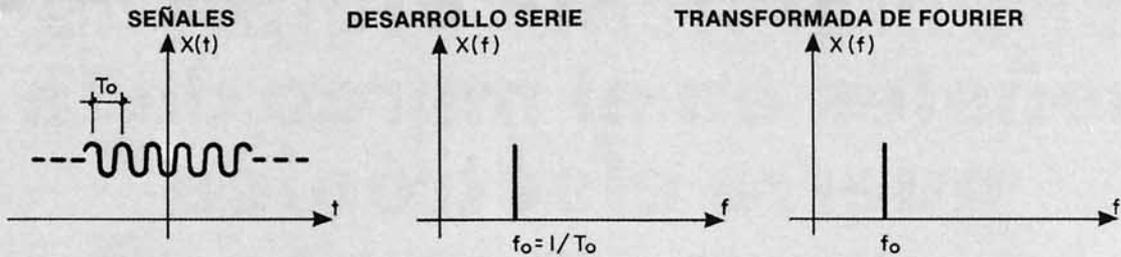
— Señal con armónicos  $f_0$ ,  $3f_0$  y  $5f_0$  y sus muestras. — Señal con armónicos  $f_0$  y  $3f_0$  y sus muestras.

b) Tren de impulsos de radiofrecuencia y su espectro de frecuencias.

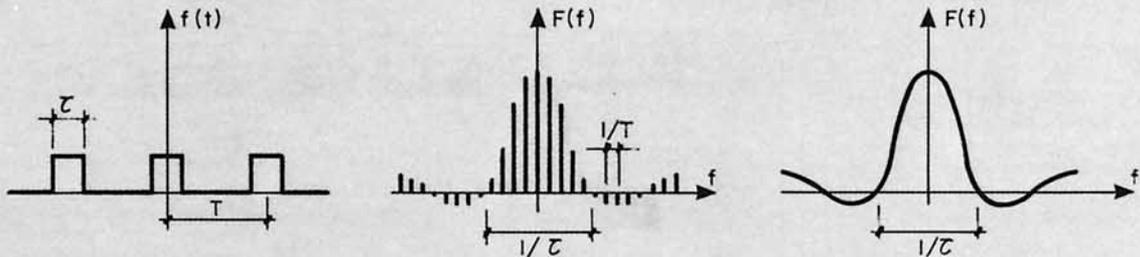


**ANEXO 2 - DESCOMPOSICION EN SERIES Y TRANSFORMADAS DE FOURIER**

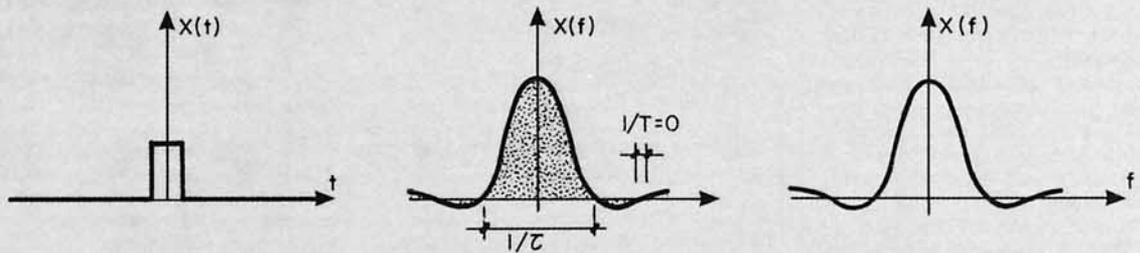
**• SEÑALES CONTINUAS**



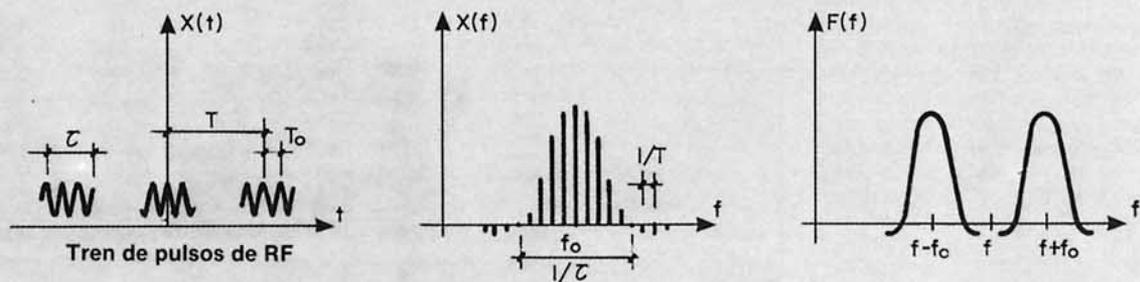
Onda continua sin modular



Tren de pulsos vídeo

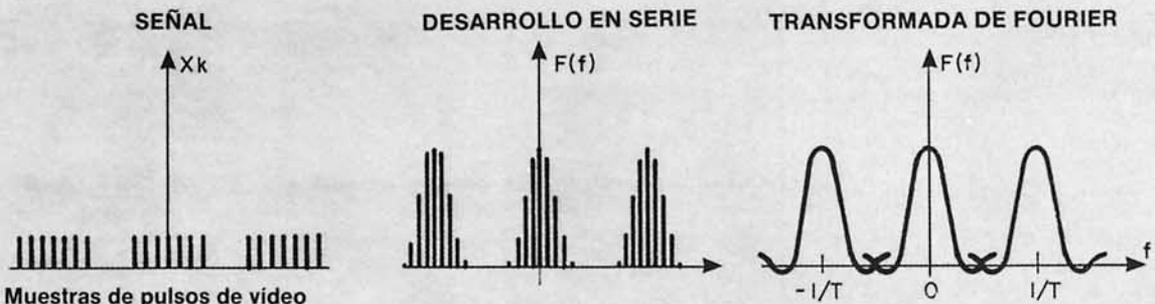


Pulso único (tren de pulsos de vídeo con PRT = ∞) Las líneas se condensan.



Tren de pulsos de RF

**• SEÑAL DISCRETA**



Muestras de pulsos de vídeo

por los actuales sistemas misilísticos (100 nseg.), podemos llegar a la conclusión de que los receptores a emplear tienen que ser capaces de efectuar el barrido de toda la banda asignada con rapidez extrema, para poder interceptar las señales de modulación avanzada, y ser altamente versátiles y de fácil adaptación a las técnicas de modulación empleadas por las amenazas.

Consecuentemente, los sistemas de Guerra Electrónica deben estar controlados por computadores digitales muy rápidos, con gran capacidad de almacenamiento y cálculo, a fin de poder adaptarse a los barridos y técnicas de modulación empleadas en cada caso, por lo cual resulta imprescindible el Tratamiento Digital de las Señales y el empleo de la Transformada de Fourier.

En este artículo se pretende exponer los principios en los que se basa el Tratamiento Digital de la Señal, el empleo de la Transformada de Fourier, y las tareas que realiza en dicho tratamiento el ordenador digital.

## EL MUESTREO DE SEÑALES

Para el procesamiento en el ordenador de las señales radioeléctricas, es preciso transformarlas primero en señales digitales. Este proceso, denominado "muestreo de señales" consiste en tomar a intervalos regulares de tiempo las muestras de la señal para determinar su valor en el instante de muestreo.

El intervalo de tiempo en que se toman las muestras se denomina "período de muestreo" (T), y el conjunto de las muestras obtenidas recibe el nombre de "secuencia", siendo la longitud de la secuencia el número de muestras (n) que constituye el conjunto.

Como la señal radioeléctrica es una función continua  $f(t)$  dependiente del tiempo, el valor de una muestra tomada en el instante  $t = kT$  será el valor que toma la función en dicho instante, es decir,  $f(kT) = x_k$ . La primera muestra de la secuencia se toma en el instante  $t = 0$ , luego su valor será  $x_0 = f(0)$ . Como la señal digital obtenida por muestreo tiene que sustituir a la señal continua original, el muestreo debe realizarse siguiendo unas normas establecidas por Shannon en el Teorema denominado del muestreo, que dice lo siguiente:

*Para poder sustituir una señal continua por una secuencia de la misma, obtenida por muestreo, sin pérdida de identidad, el período de muestreo tiene que ser, como máximo, igual a la mitad del período del*

*máximo armónico contenido en la señal muestreada.*

En el Anexo 1 se presenta una señal constituida por tres señales fundamentales (armónicos) de frecuencias  $f_0$ ,  $3f_0$  y  $5f_0$ . Puede observarse que si el período de muestreo es  $1/10f_0$  (mitad del período de la señal de frecuencia  $5f_0$ ), la envolvente de las muestras se asemeja a la señal continua original, mientras que si el período de muestreo es  $1/6f_0$ , la envolvente se asemeja a una señal que sólo contiene dos señales fundamentales de frecuencias  $f_0$  y  $3f_0$ ; es decir, el quinto armónico de  $f_0$  se ha filtrado como consecuencia de la elección del período de muestreo. Como vemos, el tratamiento digital de las señales ya tiene una ventaja, el filtrado de señales indeseadas.

## LA TRANSFORMADA DE FOURIER

Los parámetros característicos de una señal radioeléctrica son, entre otros:

- Su frecuencia central ( $f_0$ ).
- Tipo y frecuencia de modulación (FM, AM,  $F_m$ ).
- Desviación en frecuencia (f), o índice de modulación (m).
- Ancho de Banda (AB) o de impulso (AP).
- Frecuencia de repetición de impulsos (PRF), o período de repetición de impulsos (PRT).

Como la mayoría de ellos están expresados en términos de frecuencia, o tienen su correspondencia en este dominio, es más aconsejable el estudio de la señal en términos de frecuencia. Para ello se recurre al desarrollo de la señal temporal  $f(t)$  en series de Fourier. Como sabemos, toda señal periódica puede descomponerse en una suma de términos conocidos como armónicos de la señal, y caracterizados por su naturaleza cosenoidal. Para representar gráficamente la señal se utiliza un sistema de ejes cartesianos (amplitud-frecuencia). Si la serie tiene un número finito de términos se dice que la señal es de banda limitada, ya que la señal que la origina tiene sus componentes dentro de un margen finito de frecuencias. Dada la identidad  $\cos a = \cos(-a)$ , podemos descomponer cada una de las señales fundamentales (armónicos) de la señal estudiada en una suma de dos términos de amplitud mitad a la del armónico, y representar dicha señal en forma simétrica respecto a la frecuencia central. La representación de la señal en el dominio de la frecuencia se denomina espectro de frecuencias, puesto que nos presenta las frecuencias contenidas en

la misma, es decir, el contenido de armónicos de la señal, y su aportación en amplitud o potencia a la misma.

Considerada pues la señal como un cierto número de señales armónicas centradas sobre una señal de frecuencia  $f_0$ , con frecuencias  $f_0 \pm nf_0$  para cada armónico de orden "n", el ancho de banda de dicha señal será igual a la diferencia entre las frecuencias del máximo y mínimo armónicos; es decir,  $AB = f_0 + nf_0 - (f_0 - nf_0) = 2nf_0$ .

Para ampliar la transformación al dominio de la frecuencia de señales no periódicas, podemos considerar la frecuencia  $f_0$  muy pequeña, así, la diferencia entre dos armónicos contiguos será  $(n + 1)f_0 - nf_0 = f_0$  también pequeña, el número de términos necesarios para cubrir el ancho de banda de la señal será infinito, y la suma se convertirá en una integral denominada de Fourier, aplicada a todo tipo de señales, periódicas y no periódicas, que da origen a la denominada Transformada de Fourier (Anexo 2).

Consecuentemente, mediante la descomposición de la señal en series de Fourier, o mediante la Transformada de Fourier, toda señal temporal  $f(t)$  definida en el dominio del tiempo, puede trasladarse al dominio de la frecuencia, resultando una función  $F(f)$ . Inversamente, conocida una señal  $F(f)$  en el dominio de la frecuencia, puede trasladarse al dominio del tiempo, y expresarse como una función temporal  $f(t)$ .

## LA DETECCION AUTOMATICA

Un detector automático efectúa básicamente las dos operaciones siguientes:

- Interceptación de las señales.
- Extracción de la información.

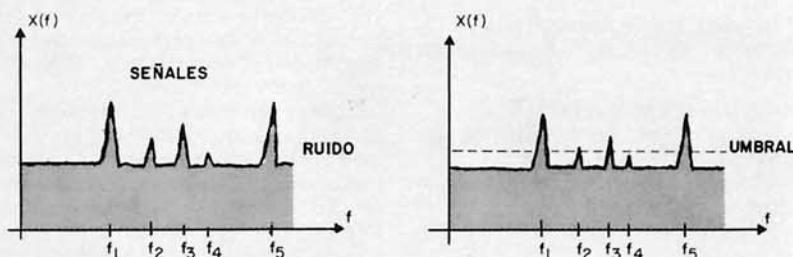
Para la interceptación de las señales, el sistema debe tener capacidad para discernir si la señal recibida contiene información o es simplemente ruido. La decisión se toma analizando las propiedades estadísticas de las señales (Anexo 4), y dado que la señal siempre vendrá mezclada con ruido, se establece el umbral de detección (mínimo valor que debe tener la señal para poder ser detectada) de forma que sea igual al valor medio de la señal más la media del ruido; debido a ello, si la señal es muy alta, al aumentar su valor medio aumenta el nivel de detección y pueden perderse señales de menor amplitud. Lo mismo ocurre si el nivel de ruido aumenta hasta niveles próximos al valor de la señal.

### ANEXO 3 - CORRELACION TEMPORAL DE SEÑALES

SEÑALES INTERCEPTADAS POR ORDEN DE LLEGADA								
Frecuencia ( $f_0$ )	1	2	3	4	5	6	7	8
Ancho pulso (AP)	100	100	100	170	100	100	100	150
Dirección (DOA)	45	45	45	30	50	50	50	40
(PRF)	10	10	10	20	10	10	10	30
Tiempo de intercept.	0	2	4	5	10	12	14	17
Tipo de señales	STAGGER			S.C.	STAGGER			S.C.

### ANEXO 4 - DIRECCION AUTOMATICA

Señales mezcladas con ruido, nivel de detección y pérdida de señales de pequeña amplitud, debido al umbral de detección.



Una vez interceptadas las señales, el sistema tiene que ser capaz de identificarlas con sus emisores y poder extraer la información que contienen y sus parámetros característicos. Para señales radar, los parámetros más interesantes de analizar son la dirección de llegada de la señal (DOA), el tipo de señal (CW o pulsada), la frecuencia de repetición de impulsos (PRF), el ancho de pulso (AP) y la frecuencia central ( $f_0$ ) de la señal.

Para la extracción de estos parámetros, la señal tiene que sufrir un procesamiento basado en la correlación de las señales, si se efectúa en el dominio del tiempo, y en el análisis espectral si se realiza en el dominio de la frecuencia. En el Anexo 3 se presenta una tabla de medidas de señales simultáneamente interceptadas. De su análisis podemos determinar que las tres primeras proceden del mismo emisor por proceder de la misma dirección, tener iguales anchos de pulso, repetirse periódicamente y variar muy poco en su frecuencia central. Esta señal sería clasificada como

una señal "stagger" y su PRF se determinaría a partir de la diferencia de tiempos existente entre dos pulsos idénticos.

#### LA UTILIDAD DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER Y EL TRATAMIENTO DIGITAL DE LA SEÑAL

Cuando se muestrea una señal analógica, los valores de cada muestra obtenida pueden almacenarse en la memoria de un computador digital, como conjunto de valores de una señal discreta. Para este tipo de señales existe una relación interesante entre dichos valores y los coeficientes del desarrollo en serie de la transformada de Fourier de la señal original. Esta relación es la siguiente:

*Los coeficientes del desarrollo en serie de Fourier de la transformada de Fourier de una señal analógica, vienen dados por el producto del período de muestreo con que se toman sus muestras por el valor de*

*cada muestra obtenida en el instante del muestreo.*

Por consiguiente, si disponemos en el computador de un algoritmo capaz de calcular la Transformada de Fourier de una señal discreta, a partir de sus muestras, podemos realizar el análisis de la señal radioeléctrica en el dominio de la frecuencia, previo muestreo de la misma.

El Tratamiento Digital de las Señales consiste en la transformación de las mismas, mediante la aplicación a sus muestras de algoritmos aritméticos. En el dominio del tiempo, uno de los algoritmos básicos es la convolución discreta. Mediante ella, se obtienen las funciones de correlación discretas, y aplicando a estas funciones la Transformada de Fourier, obtenemos las densidades espectrales de las señales originales. Para señales aleatorias, la más simple es el ruido blanco discreto, que se caracteriza por tener densidad espectral constante. A partir de esta señal es posible obtener, mediante un filtro adecuado, cualquier tipo de señal aleatoria de tipo estacionario. Inversamente, conocida la densidad espectral de una señal aleatoria estacionaria, podemos modelar un filtro  $H(w)$  que, excitado con ruido blanco discreto nos reconstruya la señal considerada. Consecuentemente, si disponemos de registros oscilográficos de señales de ruido en ambientes específicos (clutter de mar, ruido atmosférico, interferencias intencionadas) podemos obtener el algoritmo aritmético capaz de filtrar estas señales indeseables (Véase Anexo 5).

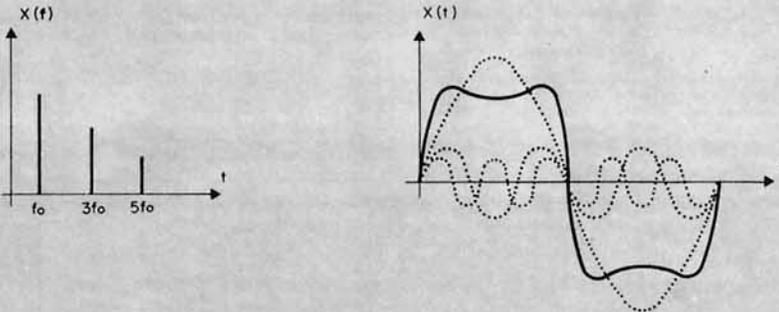
Por otra parte, dado el carácter discreto de las funciones manejadas, al venir definidas por medio de secuencias, podemos definir en el computador los "arrays" capaces de almacenar los valores de las muestras de las señales, para su identificación y extracción de sus parámetros característicos.

Sin embargo, existe un grave inconveniente en el Tratamiento Digital de la Señal. El Teorema de muestreo nos impone una mínima velocidad de muestreo hasta ahora no lograda para señales superiores a 40 MHz., puesto que los convertidores analógico/digitales (A/D) más rápidos que actualmente existen no superan los 20 MHz. Para resolver este problema, la solución adoptada consiste en el Tratamiento Digital de la Señal de Video (envolvente de la radiofrecuencia), una vez detectada, a partir de la cual podemos procesar digitalmente señales con anchos de pulso desde 100 nseg., que son entre otros los utilizados por los más modernos sistemas misilísticos.

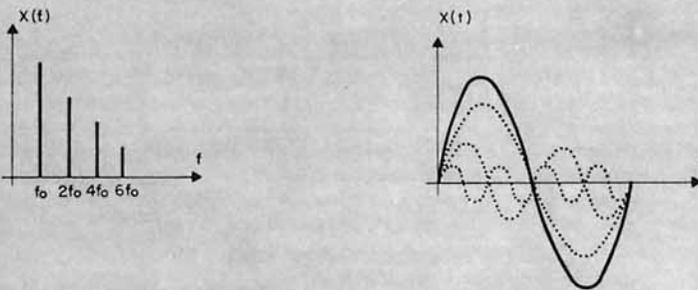


**ANEXO 6**  
**SINTESIS DE SEÑALES**

**a) Generación de una onda cuadrada a partir de sus armónicos impares.**



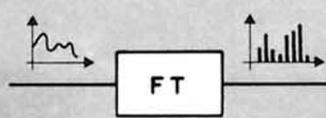
**b) Generación de una onda triangular a partir de sus armónicos pares.**



**c) Transformada Directa de Fourier**



**d) Transformada inversa de Fourier**



dominio de la frecuencia al dominio del tiempo; y si para procesar en el ordenador la señal analógica precisábamos de convertidores A/D, para la conversión de la señal digital en analógica necesitamos convertidores digital/analógicos (D/A) que la transformen en señal continua. Dicho en otros términos, a partir de una señal continua, mediante la Transformación de Fourier podemos obtener el espectro discreto de frecuencias de la misma, con lo cual la señal se descompone en una suma de señales elementales (armónicos). Inversamente, la síntesis de señales nos permite obtener una señal compleja a partir de sus armónicos ele-

mentales, sumándolos ponderadamente (Ver Anexo 5).

De todo ello, es fácil comprender que la síntesis de señales por ordenador es un arma para la enseñanza práctica de la Teoría de la Comunicación, ya que no se precisa equipamiento específico para la generación de señales, y pueden variarse a voluntad los parámetros de las mismas que se quiera sintetizar, simular interferencias entre ellas y comprobar los efectos que una perturbación puede crear sobre una señal determinada.

Si después de la paciente lectura de esta exposición hemos podido llegar a conectar con las actuales

técnicas empleadas en los sistemas de Guerra Electrónica, y ha sido correctamente ponderada la importancia que en los mismos tiene el Tratamiento Digital de Señales y el el predominante papel desempeñado por los ordenadores de a bordo, podremos llegar a las siguientes

**CONCLUSIONES**

Las posibilidades de las actuales tecnologías, en especial las posibilidades y capacidades de los modernos ordenadores, para el procesamiento digital de las señales electromagnéticas, hace que todo lo relacionado con el mismo, y dentro del marco de la Guerra Electrónica, sea un poderoso instrumento que contribuye eficazmente a la supervivencia de la fuerza y al éxito de las operaciones aéreas.

La discreción de las técnicas en las operaciones y sistemas de Guerra Electrónica, hace necesario disponer de medios propios, materiales y humanos, capaces de elaborar sistemas adaptados a las necesidades de la Defensa Nacional, ya que el Tratamiento Digital de la Señal facilita el diseño de los dispositivos físicos (hardware) y la confidencialidad y optimización de los sistemas radica en la elaboración de algoritmos (software) y su implementación en el ordenador.

Siendo de la mayor importancia para el Ejército del Aire el desarrollo y aplicación de estas tecnologías, para encauzar los esfuerzos y estudios que actualmente se llevan a cabo en la Universidad y en la Industria nacionales, debe aportar su esfuerzo material y humano en la investigación de estas materias a fin de establecer con claridad las prescripciones y especificaciones técnicas operativas de los sistemas.

Por otra parte, en el área de la enseñanza práctica, y dentro del citado marco, mediante la síntesis de señales pueden desarrollarse paquetes de software operativo, analizando los efectos perturbadores de distintas técnicas sobre amenazas conocidas o detectadas, que pueden facilitar el entrenamiento del personal.

Finalmente, señalar que la enseñanza de Técnica Digital, Microprocesadores y Conmutación y Transmisión Digital que actualmente se imparte en la Escuela de Transmisiones del Ejército del Aire en los diferentes niveles de Especialización de Jefes y Oficiales (TR, CI y EW), Entrenamiento Suplementario (MEL, MT, RT) y Entrenamiento Básico (MEL, MT, RT, OAC) deberá proyectarse hacia el Tratamiento Digital de la Señal y su software específico. ■