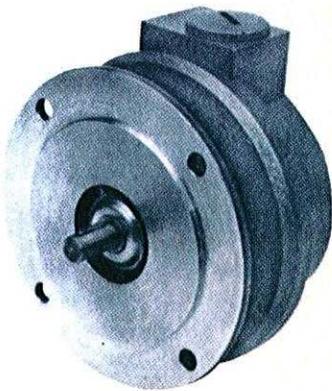


¿QUO VADIS, TÉCNICA DE ACCIONAMIENTOS?

José M. Puchol Vivas, Dr. Ing. Industrial
Miguel Puchol, B Eng (Hons)

Decíamos en junio...

Rememorando con toda modestia a nuestro clásico **Fray Luis de León**, en el número de Dyna correspondiente a junio pasado, expusimos el considerable avance técnico que suponen las tacodinamos Longlife, con anillo de plata inserto en el colector, frente a las antiguas dinamos tacométricas con-



TD 3 B 5 AL

Figura 1

vencionales, de colector de cobre y escobillas de grafito/plata.

Desde que existen accionamientos eléctricos regulados, se ha intentado hallar el medio de regular la velocidad del accionamiento sin una realimentación del valor instantáneo de la velocidad, ya sea en máquinas de continua con compensación IR o, actualmente, en máquinas asincrónicas

con el cálculo del campo magnético del estator a partir de datos del motor y de los valores medidos eléctricamente.

Todos los procedimientos indirectos solamente proporcionan un valor aproximado del valor instantáneo de la velocidad, de modo que cuando se pretenden alcanzar resultados más precisos, no es posible prescindir de la medición del valor instantáneo (valor actual = Istwert) de la velocidad. De ahí la suma importancia que tienen los transductores, de uno de los cuáles dábamos cuenta en nuestro anterior trabajo: las actuales dinamos tacométricas Longlife, con anillo de plata en el colector.

Avanzábamos en aquel trabajo que el desarrollo actual de la técnica de accionamientos regulados opta preferentemente por soluciones digitales, entre las que se encuentran los encoders (codificadores) incrementales, que han proliferado como setas en octubre lluvioso, y los codificadores absolutos. De ellos vamos a tratar, presentando asimismo nuevos desarrollos optoelectrónicos que, con toda seguridad, tendrán un importante papel en los futuros accionamientos regulados.

No obstante, queremos dar otro apunte sobre el tema de regulación continua versus convertidores: en una reciente (junio 98) reunión de directivos de una importante multinacional en Barcelona, se han expuesto los excelentes resultados (instalaciones) logrados en el último ejercicio en el campo de la continua y tomado decisiones sobre la estrategia a seguir. Simultáneamente, otra importante multinacional, que

había abandonado prácticamente el campo de la continua, vuelve a reflexionar sobre la conveniencia de un retorno, a la vista de los buenos resultados obtenidos por su competencia en este campo. Ello confirma nuestra opinión de que, aunque el futuro nos lleva a los accionamientos de alterna y a soluciones optoelectrónicas, la continua todavía no es historia.

Antes de entrar en los codificadores, nos permitiremos un paréntesis que acogerá una corta selección de otros transductores que no queremos dejar pasar por alto, dada su también actual aplicación, intentando establecer entre ellos un breve análisis comparativo que nos permita decidir sobre la conveniencia de su empleo en cada caso.

1. A, B y C: tres transductores dignos de mención

A. Tacogeneradores de alterna

Cuando en una regulación no es preciso conocer el cambio de sentido de giro del accionamiento, y, al propio tiempo, no es importante que el transductor utilizado dé una tensión con bajo contenido de componente alterna, entonces se alcanza una solución económica y exenta de mantenimiento con los tacogeneradores de corriente alterna.

En un tacogenerador de alterna, de modo semejante a las tacodinamos de continua, el campo magnético está generado por imanes permanentes. Si en el inducido se disponen tres arrollamientos desplazados entre sí 120 grados eléctricos, la co

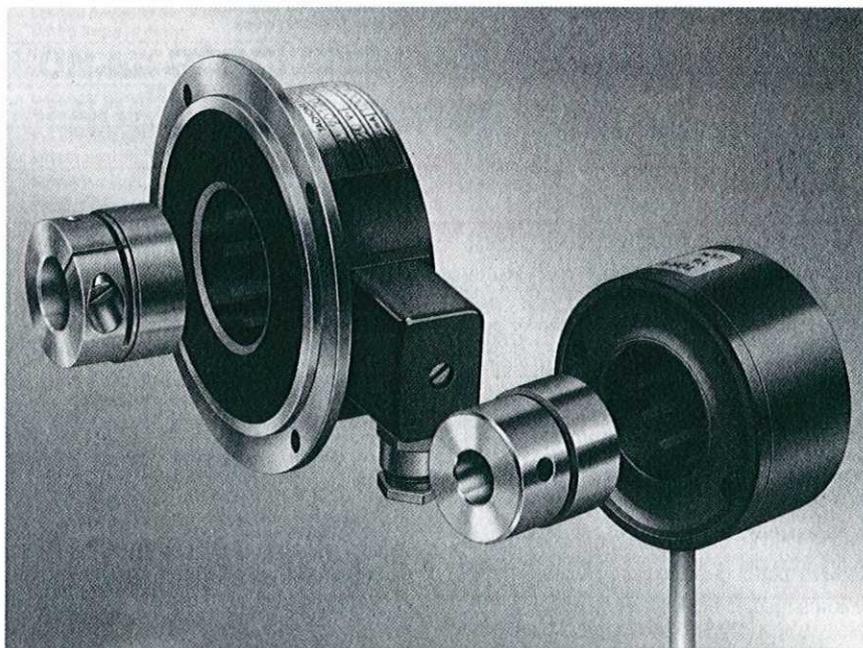


Figura 2

riente rectificada resultante es unidireccional, con una ondulación restringida, siendo la amplitud y la frecuencia de la tensión un valor proporcional al número de revoluciones del tacogenerador y, por tanto, del motor al que se monte para su control de velocidad.

La figura 1 muestra un tacogenerador de corriente trifásica con una salida de tensión rectificada de 30 V, con un rotor de

ocho polos de imanes permanentes AlNi-Co en una ejecución con brida y eje saliente. Como referencia, este tacogenerador tiene una ondulación punta a punta del 15% y un error de linealidad de aproximadamente el 1%, con una intensidad máxima de corriente de salida de 20 mA.

Entre las ventajas de los tacogeneradores de alterna podemos citar su precio económico, así como su robustez y ausencia

de mantenimiento. También el amplio rango de temperaturas posibles y la no necesidad de energía auxiliar.

En la figura 2 se muestra un tacogenerador de alterna, con los imanes dispuestos en el rotor, en ejecución de eje hueco, en cuya caja de bornes del estator se ha emplazado un puente rectificador, que se representa en la figura 3. El valor de la ondulación en uno de estos generadores es de, al menos, un orden superior al de las tacodinamos de continua. Este hecho, la imposibilidad de reconocer el sentido de giro (no existe cambio de polaridad cuando hay cambio de sentido de giro), y el que en el entorno de cero no son capaces de regular, ya que es necesario un mínimo valor de la velocidad de giro para su actuación, limitan su empleo en la práctica.

B. Resolver:

Por su precio económico y la sencillez de su aplicación, los resolvers han tenido una brillante irrupción en la regulación de accionamientos, si bien su actual aplicación está cada vez más limitada por el abaratamiento de sus competidores.

El principio de funcionamiento aparece como muy simple a primera vista (figura 4). La tensión alterna u transferida al rotor $u = U \text{ sen } (\omega t)$ induce en los dos arrolla-

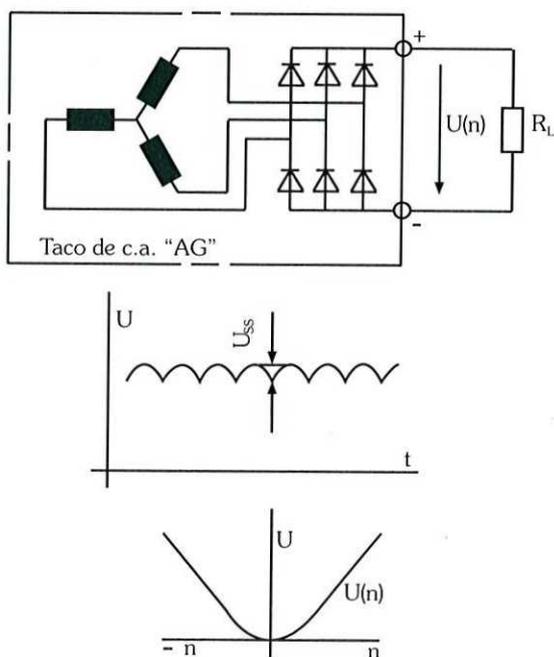


Figura 3

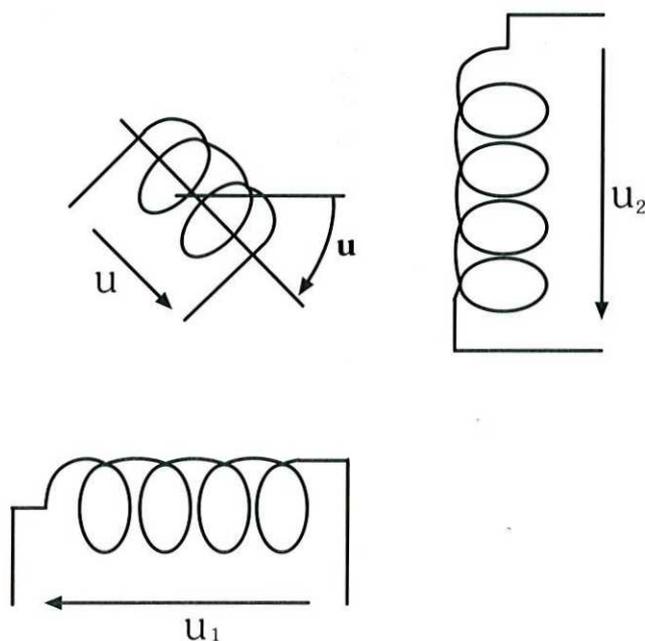


Figura 4

mientos del estator, desplazados entre sí 90 grados, las tensiones u_1 y u_2 dependientes de la posición del rotor:

$$u_1 = kU \sin \vartheta \cdot \sin (wt + \zeta)$$

$$u_2 = kU \cos \vartheta \cdot \sin (wt + \zeta)$$

donde k es el factor de transferencia y ζ el desfase entre la tensión u del primario y las tensiones u_1 y u_2 del secundario.

De las tensiones u_1 y u_2 moduladas en amplitud es posible obtener el ángulo de rotación del rotor:

$\vartheta = \arctan u_1/u_2$, como señal de posicionamiento, y la velocidad angular:

$v = d\vartheta/dt$, como señal del número de revoluciones por minuto.

En la figura 5 se muestra un resolver con un rotor de eje hueco de 22 mm.

En un resolver típico de dos a seis polos se aplica al devanado primario del rotor una tensión alterna constante, de frecuencia comprendida entre 5-10 kHz. Como hemos dicho, actuando como un transformador, dos devanados de estator inducen tensiones de salida desfasadas eléctricamente 90 grados. La amplitud de las tensiones de salida representa directamente seno y coseno del ángulo de posición del motor.

Las ventajas del resolver se encuentran en la ausencia de elementos de roce mecánico y su resistencia ante choques, vibraciones y variaciones de temperatura. Pueden utilizarse en una amplia gama de velocidades, que llegan hasta las 15.000 r.p.m. y ello con largos periodos sin revisión. Una de sus aplicaciones clásicas es en la conmutación de servomotores sin escobillas.

La desventaja principal es el coste adicional de la importante aportación electrónica que exigen, pero también debe decirse que incluyen errores inherentes al sistema, tales como los ocasionados por las imperfecciones de las ranuras del rotor y del estator, los errores de transferencia por los arrollamientos, los originados por la excentricidad del rotor, etc.

Por ejemplo, en el caso típico descrito y para su empleo en la conmutación de un motor sin escobillas: Un dispositivo electrónico especializado determina la posición del rotor. Con una señal de entrada del resolver de 10 kHz, por ejemplo, la posición del rotor se explora cada 100 microsegundos. Sin embargo, en cambios a velocidad elevada sólo puede obtenerse un nuevo valor de velocidad después de un cierto retardo de tiempo, el que se precisa para que el dispositivo electrónico pueda determinar el nuevo valor.

También las velocidades muy bajas causan problemas: Un resolver detecta solamente la posición del rotor, por lo que su velocidad debe calcularse a partir de la variación entre dos posiciones del mismo. Para realizar esta operación, un buen resolver usa 12 bits por revolución o 4.096 pasos. Incluso un controlador de accionamiento moderadamente rápido tiene un tiempo de ciclo de 1 ms y es capaz, por tanto, de realizar 1000 mediciones por segundo. Para producir 1000 valores distintos medidos en un segundo, un resolver de buena calidad de 12 bits debe girar casi un cuarto de vuelta, lo que equivale a una velocidad de rotación de 15 r.p.m. Por debajo de esta velocidad, la realimentación del sistema de accionamiento trabajará con menor resolución, lo que es inaceptable.

El retardo del tiempo del cálculo del valor de velocidad y la precisión del resolver los hacen aptos para muchas aplicaciones de accionamientos, pero no son adecuados para las elevadas exigencias dinámicas de los modernos servoac-



Figura 5

cionamientos, ni tampoco lo son por su poca precisión a velocidades muy bajas.

C. Tacogenerador de tensiones trapezoidales

Si un rotor con imanes permanentes gira en el interior de un estator en el que se han dispuesto arrollamientos convenientemente desplazados entre sí, entonces se generan en dichos arrollamientos tensiones alternas desfasadas.

Mediante un adecuado diseño del rotor y de los devanados del estator, se fabrican estos tacogeneradores de tensiones trapezoidales, como el que se muestra en la figura 6, de modo que en ellos las tensiones generadas tienen forma de trapecios, cuyo desplazamiento relativo entre sí permite, mediante una rectificación electrónica (figura 7) obtener una resultante continua cuya amplitud es proporcional a la velocidad de giro del rotor.

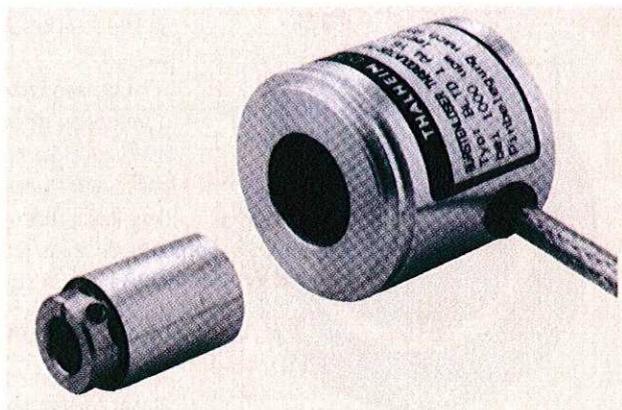


Figura 6

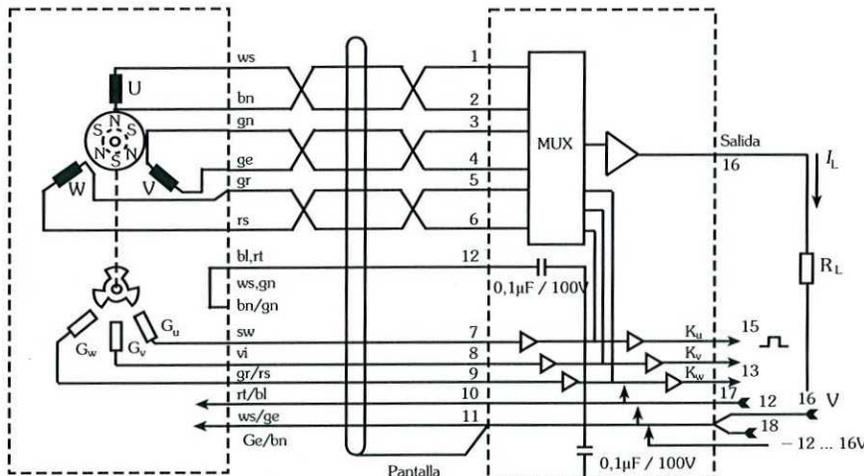


Figura 7

En la década de los 80 se introdujeron en el mercado los motores de imán permanente y conmutación por onda cuadrada de las corrientes del estator. Aunque no precisan mantenimiento, presentan una ondulación del par debido a que, por ejemplo, con un rotor de 6 polos y un estator trifásico solamente se pueden tener 18 pasos de conmutación por revolución, y las corrientes del estator han de crecer y decrecer en la armadura bruscamente.

Las tacodinamos trapeziales tienen una construcción similar y alcanzaron cierto esplendor al ser combinados con sistema de reconocimiento de la posición del rotor mediante sensores por efecto Hall.

Aunque sí tienen capacidad de reconocer el sentido de giro, por cambio de polaridad en la rectificación electrónica, y están exentas de mantenimiento, pueden trabajar en un elevado rango de temperaturas y son muy robustas, la necesidad de una energía auxiliar, para el sensor de posición

del rotor, el estrecho campo de velocidades de aplicación, su inexactitud, y el elevado precio de la electrónica adicional, ha limitado su empleo a los motores sin escobillas, o a los motores con conmutación electrónica.

2. Llegó el turno de las tacodinamos digitales o codificadores incrementales

Si en un disco graduado (figura 8) con rendijas abiertas a través de las cuales puede pasar un haz de luz, seguidas de rendijas cerradas que impedirán el paso del haz de luz, disponemos una detección optoelectrónica, el resultado será que estaremos creando un tren de impulsos rectangulares.

Si partimos de una determinada posición del disco, el número de impulsos que cuenta la electrónica representará el desplazamiento angular del disco, mientras que el número de impulsos por vuelta, representará la frecuencia, esto es la velocidad de rotación del disco.

Las tacodinamos digitales, también denominadas generadores de impulsos, y más conocidas entre los usuarios como encoders incrementales o simplemente encoders (codificadores), pueden, de modo semejante a los resolvers, ser empleados en la técnica de velocidad y posicionado de accionamientos.

La exploración del disco de impulsos de los codificadores incrementales tiene lugar mediante lámparas miniatura o, más

frecuentemente, mediante diodos emisores de luz, cuya luz es modulada en su intensidad casi sinusoidalmente por el disco, y recogida por fotorreceptores en conexión push-pull. La constancia de la relación de exploración de las señales electrónicas impulso-pausa (High-Low) queda aquí asegurada por la conexión push-pull, incluso aunque se produjeran variaciones de la intensidad de luz, ya sea por causas exteriores (por ejemplo, temperatura), o bien por envejecimiento del sistema.

Para obtener una buena información de la velocidad (en particular cuando se trabaja a bajas velocidades) se entiende que es deseable un elevado número de líneas en el disco graduado, o, como se dice en la práctica, tener una alta resolución. De esta circunstancia podemos ya diferenciar que el material del que está formado el disco incremental puede ser de metal, hasta un determinado número de impulsos/vuelta (sobre 1200), o bien de vidrio, mediante la impresión al vacío de una fina capa metálica.

En la jerga del usuario se habla de técnica de vidrio o técnica de metal sin que pueda anteponerse una a otra en cuanto a índice de calidad, si bien está claro que los codificadores baratos llevan discos baratos e imprecisos, ya sean de metal o de vidrio. En la calidad y precisión del disco está el inicio de la calidad y precisión del codificador.

Cuando un disco incremental con un elevado número de líneas (por ejemplo 5.000), gira a gran velocidad frente a un lector optoelectrónico, es evidente que éste tiene que estar facultado para captar la altísima frecuencia de paso de las líneas frente al lector. Consecuentemente, la frecuencia de conmutación es un índice de calidad del codificador, y una buena referencia para el usuario a la hora de establecer comparaciones de precio/calidad de los codificadores.

Por otra parte, la velocidad máxima, desde el punto de vista eléctrico, a la que puede funcionar un codificador no es un valor cualquiera, sino que está limitado de acuerdo con el número de ranuras del mismo, según:

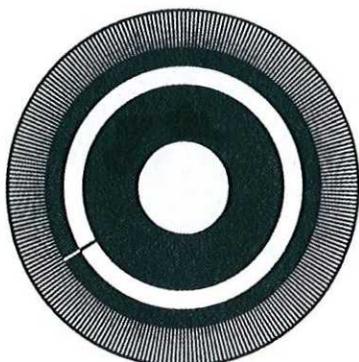


Figura 8

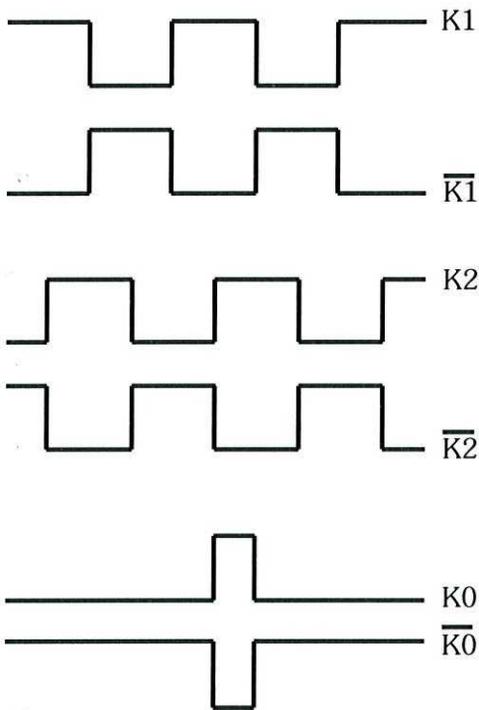


Figura 9

$15 \times 1000000 / Z = 12.000$, donde Z es el número de ranuras del disco.

Evidentemente, desde el punto de vista mecánico, también existe una limitación de la velocidad del codificador, impuesta por factores constructivos, amén de los cojinetes.

Para poder reconocer el sentido de giro del accionamiento, un codificador precisa disponer de dos lectores desplazados entre sí 90 grados eléctricos. De este modo, y según se ve en la figura 9, la primera lectura producirá un tren de impulsos rectangular, y la segunda otro tren idéntico pero retrasado 90 grados respecto al primero. De este modo, una inversión del sentido de giro se traducirá en que el segundo tren de impulsos aparecerá antes que el primero, lo cual será de inmediato reconocido por la electrónica.

En total, una tacodinamo digital - un codificador - puede incluir los seis trenes de impulsos que vienen representados en la figura 9, cuya designación varía de uno a otro fabricante. Frecuentemente se llaman canal A y canal B a los trenes de impulsos fundamentales, desplazados entre sí 90 grados, mientras que se denomina canal cero -0- al que lee la velocidad, es

decir, al que lee un impulso por cada vuelta del disco, canal que recibe otras muchas designaciones: impulso cero, señal de referencia, *marker*, etc. Este impulso cero es el que define el desplazamiento angular del disco y, consecuentemente, el que marca el posicionamiento. Otros fabricantes utilizan la designación K1, K2 y K0 para referirse, respectivamente, a los antedichos impulsos.

En la figura 9 aparecen también otros trenes de impulsos, los invertidos de los anteriores, es decir, los que reflejaría un espejo: los mismos valores en cada instante, pero de signo contrario.

Para estos trenes, los fabricantes emplean las designaciones anteriores, pero con un trazo sobre la designación, o sea: por ejemplo \bar{A} , \bar{B} y $\bar{0}$; $\bar{K1}$, $\bar{K2}$ y $\bar{K0}$, etc.

En su momento veremos la razón de ser de estos trenes de impulsos invertidos, que algunos usuarios llaman trenes suplementarios. Como, asimismo, tenemos que aclarar la tensión de alimentación de estos codificadores, y también detalles de su cableado, interferencias en la transmisión de señales de los codificadores, y características de su electrónica de sucesión, vamos a abrir un nuevo apartado para estos importantes detalles de aplicación, que veremos seguidamente.

2. Transmisión de las señales del codificador por cables largos

Debemos darnos cuenta de que con los codificadores estamos trabajando en una banda de frecuencias (megahercios)

que entra en la telecomunicación y que, consecuentemente, las leyes que van a regir la conducción por cable de estas señales, y las perturbaciones y acciones exteriores a las que tenemos que hacer frente, serán las correspondientes a este campo de altas frecuencias.

Al contrario que otros transductores, que son autosuficientes (por ejemplo, las dinamos tacométricas), los codificadores precisan para su funcionamiento de una fuente de alimentación exterior.

En muchos casos, la distancia entre el tacómetro digital (codificador) y el equipo electrónico de regulación es tan reducida, que la transmisión de las señales puede realizarse empleando una fuente de alimentación de bajo nivel, que llamamos TTL (*Transistor-Transistor-Logic*), por mediación de circuitos de interface de corriente dúplex a tierra, equilibrados y simétricos, conforme a un interface estándar RS-422.

En esta versión TTL está prescrita una tensión de alimentación de +5 V +/- 5%, y deberá ser tenida en cuenta la caída de tensión que se produce en los cables de alimentación.

Las señales del codificador recogidas en los trenes invertidos proporcionan la ventaja de anular las perturbaciones que una tensión puede producir en la señal de salida, ya que tales perturbaciones quedan

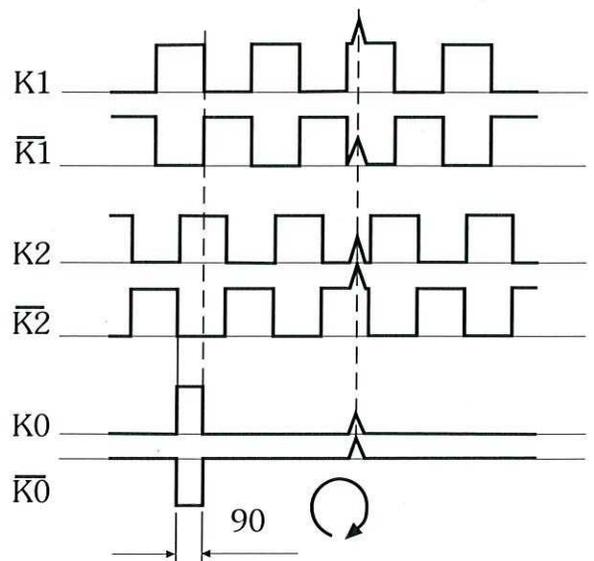


Figura 10

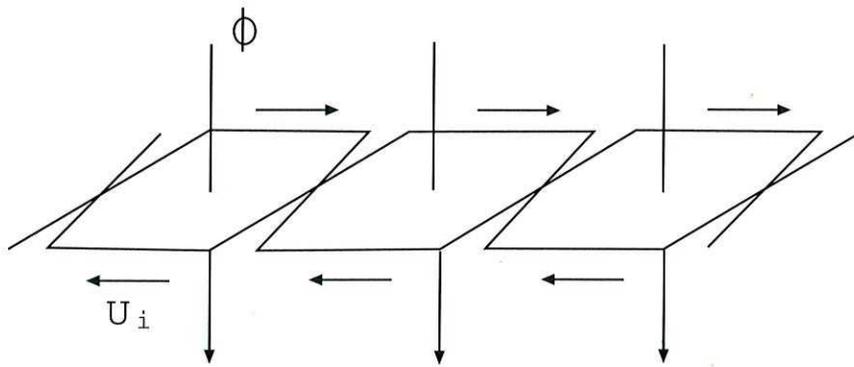


Figura 11

eliminadas por adición de valores opuestos (figura 10).

Por tanto, a pesar de la baja relación de señal/ruido del nivel lógico TTL, con suspensiones umbral de $V_{baja} = 0,5\text{ V}$ y $V_{alta} = 2,5\text{ V}$, las puntas de interferencia se superponen en todas las señales, y las señales invertidas eliminan dichas puntas, de modo que se conserva la información lógica.

Sin embargo, la capacidad del amplificador diferencial de entrada es limitada en cuanto a rechazar interferencias, por lo cual, para una transmisión de datos exenta de interferencias es muy importante una correcta elección del tipo de cable e, incluso, tomar algunas medidas como las que expondremos en el siguiente apartado.

3. Elección del cable. Funcionamiento en ambientes eléctricamente hostiles

Como hemos dicho, el tipo de cable es de extrema importancia para correcta transmisión de las señales del codificador.

Para distancias cortas, bastará con emplear un cable con conductores individuales y un apantallado común, apantallado que deberá conectarse a través de una amplia superficie tanto a la carcasa del tacómetro digital como a la del equipo de regulación, con una puesta a tierra de baja resistencia óhmica. La influencia mutua entre los conductores del cable utilizado, así como las posibles interferencias internas, son bajas debido a la corta longitud del cable.

Si las interferencias son fuertes, entonces debe utilizarse un cable formado por pares trenzados, con un blindaje común. Esto es: el cable conductor estará compuesto por un conjunto de cables menores, y cada par de ellos deben estar trenzados entre sí, tal como aparecen representados en la figura 11, al objeto de eliminar la influencia de campos inductivos parásitos.

En la referida figura 11 se observa cómo la tensión inducida en un cable con pares trenzados se subdivide en pequeñas tensiones parciales de sentidos opuestos, lo que lleva a una compensación/elimina-

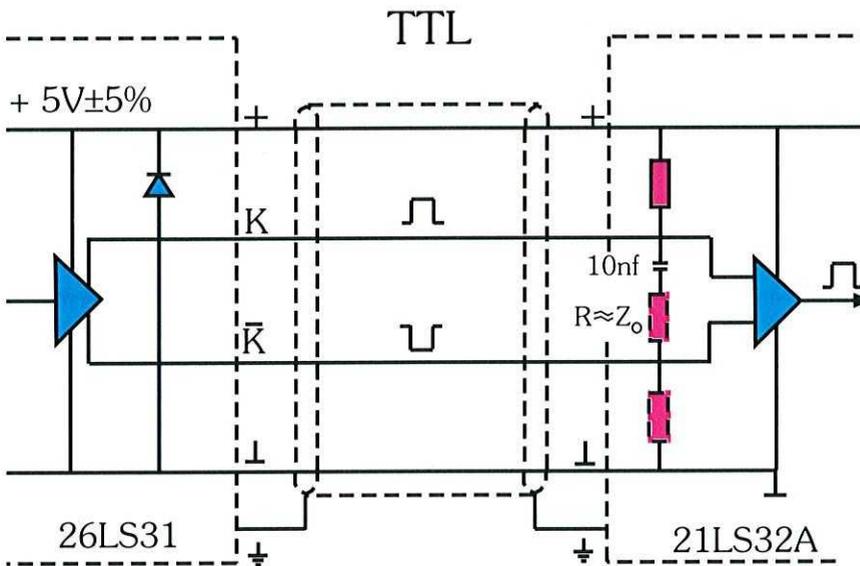


Figura 12

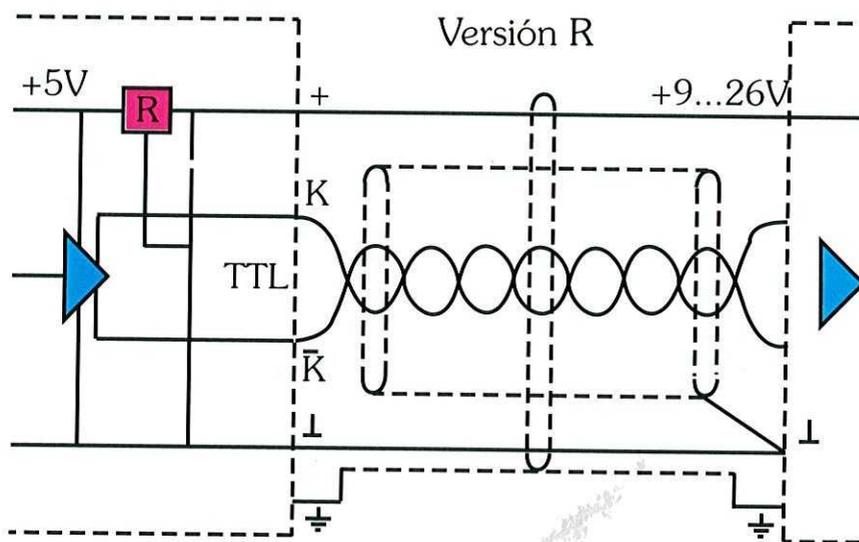


Figura 13

ción de los campos inductivos parásitos. Y esto se aplica tanto a los conductores de las señales directas, como a los de las señales invertidas. Si todos los pares de cables trenzados se encuentran envueltos por una malla metálica común, también quedarán apantallados posibles campos electrostáticos.

Pero si, a pesar de las medidas descritas, hay problemas de transmisión de la señal de los codificadores, éstos pueden deberse a problemas de inducción capacitiva, seguramente por la proximidad de conductores próximos,

En cuyo caso procederemos como si sigue:

Apantallamos individualmente cada par de cables trenzados, y luego apantallamos el paquete de los distintos cables trenzados apantallados individualmente, de modo que este apantallado común y total sea conectado a una amplia superficie grande, tanto en las carcasas de los tacómetros digitales como del equipo electrónico de regulación, mientras que las pantallas individuales de cada uno de los pares trenzados se conectan únicamente a la tierra del circuito del equipo regulador. Con ello conseguiremos eliminar posibles corrientes de equilibrio entre pantallas internas.

4. Límite de la transmisión de señales con RS-422

Si intentamos transmitir las señales de los codificadores con alimentación TTL a través de cables largos, además de las interferencias internas y externas descritas, nos encontramos todavía con otra limitación, que veremos a través del ejemplo siguiente:

Un tacómetro digital con una resolución de 1.000 impulsos/vuelta girando a 6.000 rpm genera una onda rectangular cuya frecuencia es de 100 kHz. A medida que este espectro de frecuencias crece y se aproxima a la gama de los megahercios, el cable debería cargarse con una impedancia $Z_0 = L/C$, donde L es la inductancia del cable, C la capacitancia del cable y Z_0 un valor comprendido entre 100...150 Ohmios, para evitar que se produzcan refle-

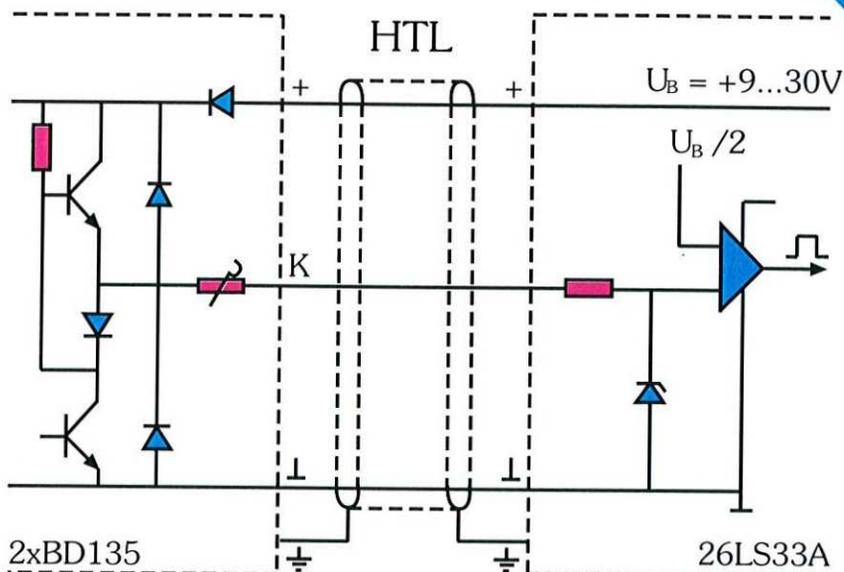


Figura 14

xiones en el extremo del cable. Lo antedicho no es sino una importante regla de las leyes de telecomunicación: para que no se produzcan ondas reflejadas al final del cable de conducción, éste debe cerrarse eléctricamente con el valor de su impedancia Z_0 , con lo que entonces se comporta como si tuviese una longitud infinita (algo semejante al fenómeno del golpe de ariete en dinámica de fluidos).

Habitualmente, para evitar el paso de una corriente continua constante entre los drivers en línea cuando el codificador es

estacionario, se conecta un condensador en serie con Z_0 (figura 12). No obstante, a la frecuencia de 100 kHz citada, el condensador funcionará como si estuviese en cortocircuito, originando que los drivers de línea suministren avalanchas de corriente a la impedancia del cable Z_0 , corrientes que, durante el período de solape de las señales, puede alcanzar los 100 mA.

El propio consumo del tacómetro digital deberá también añadirse, de modo que éste deberá alimentarse, como mínimo, a 200 mA. Un tal valor de la intensidad es

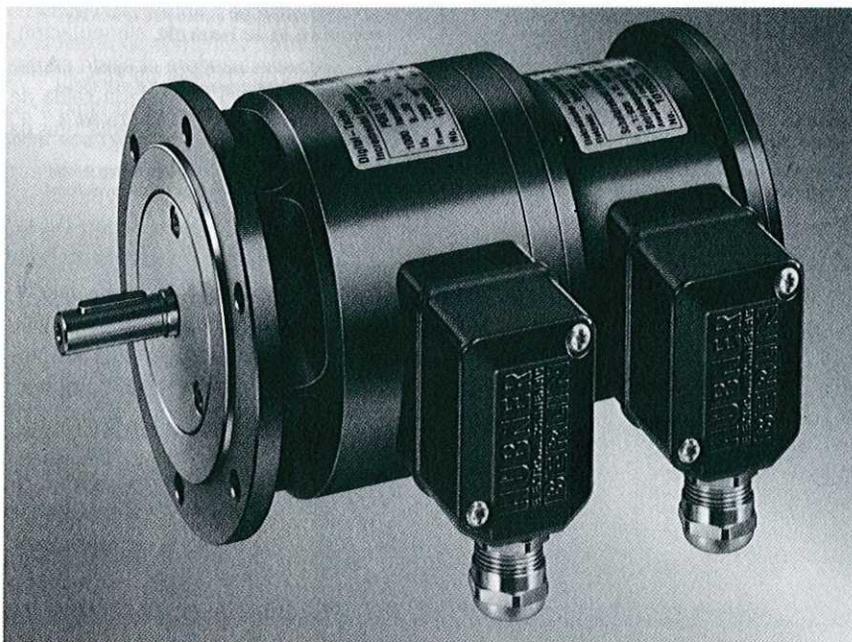
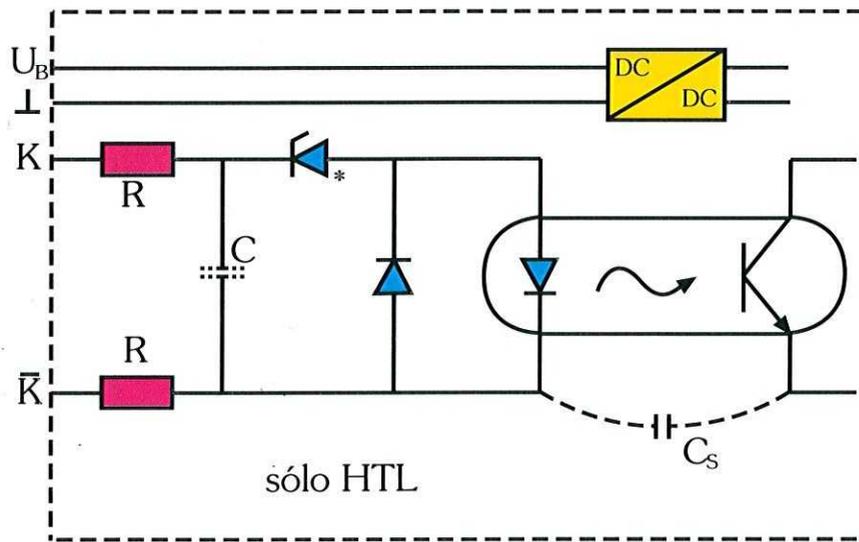


Figura 15. Conjunto monobloc Encoder + Centrifugo. Brida europea 115x85 mm. (cortesía de Hübner/Berlin)



metálica de la máquina generosamente dimensionada.

5. Transmisión de señales del codificador utilizando nivel HTL

En ambientes eléctricamente hostiles, las señales se introducen con bajo valor óhmico en un cable a una tensión de nivel alto HTL (*High Tension Level*), partiendo de una alimentación $V_b = + 9 V \dots 30 V$. Las amplitudes de salida de las señales de $V_{baja} = 1,5 V$ y de $V_{alta} = V_B - 3,5 V$ se sitúan significativamente por encima de los niveles TTL.

Un termistor (PTC) dispuesto a la salida, limita la corriente continua en el caso de un cortocircuito. Los diodos protegen los transistores contra una posible conexión de polaridad invertida de la tensión de alimentación, y también contra tensiones transitorias peligrosas susceptibles de invertir la polaridad de los transistores. La disposición de esta alimentación HTL viene representada en la figura 14.

Citemos un ejemplo: Un cable de 100 m de longitud y una capacidad interna de unos 100 picofaradios/m cargará cada *driver* de línea con 10 nanofaradios. Una amplitud de salida de, por ejemplo, 25 V, alcanzada en aproximadamente 2,5 microsegundos, exigirá que un transistor de salida impulse ondas de intensidad de 100 mA por el cable (según la ecuación $i = C du/dt$). A una frecuencia de 100 kHz, la intensidad media eficaz alcanza los 25 mA.

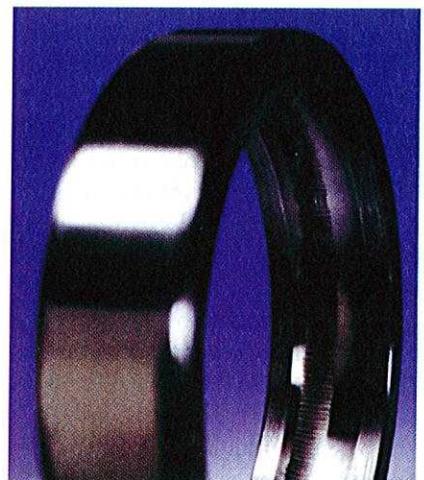


Figura 19

Figura 16

susceptible de crear una caída de tensión en los conductores de entrada, cuyo resultado puede ser que la tensión de entrada caiga por debajo de la tolerancia de $+ 5 V \pm 5\%$.

Para evitar esta circunstancia caben los tres remedios siguientes:

1. Utilizar un cable especial con conductores de mayor diámetro para la alimentación, o bien, como alternativa, conectar en paralelo los conductores de alimentación.

2. Instalar en el tacómetro digital conductores sensores, de modo que se produzca un control a distancia de la tensión de alimentación, efectuándose el ajuste en virtud del valor de la caída de tensión en los conductores de alimentación.

3. Montar dentro del tacómetro digital un regulador de circuito integrado, que reduce una tensión de alimentación variable entre $+ 9 V \dots 28 V$ hasta los $+ 5 V$ prescritos (figura 13).

Este método, económicamente más rentable, es utilizado por acreditados fabricantes de codificadores, logrando que la disipación de la potencia térmica generada se produzca fácilmente gracias a una maciza carcasa

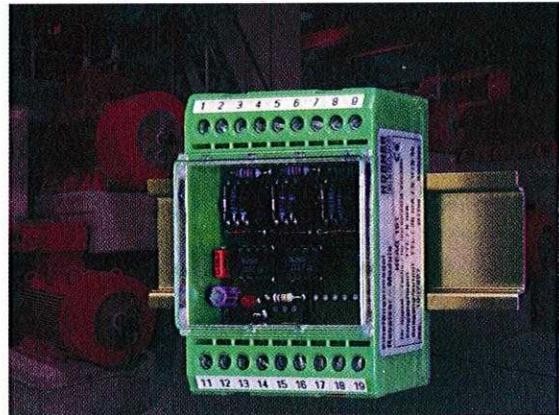


Figura 17

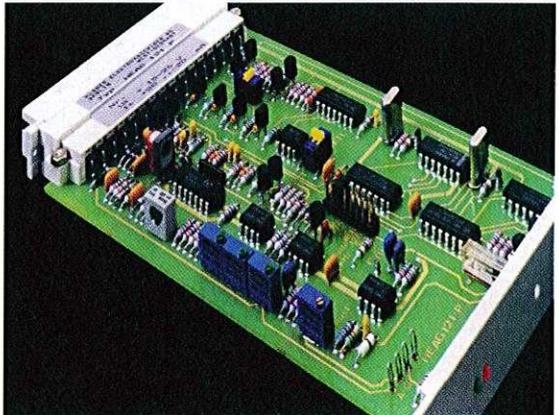


Figura 18

Por lo anterior se obtiene la conclusión de que un buen tacómetro digital debe estar diseñado con transistores de potencia de salida capaces de resistir intensidades de corriente continua de unos 60 mA.

6. Transmisión con optoacopladores

Los tacómetros digitales con alimentación HTL y trenes de impulsos invertidos garantizan la seguridad de funcionamiento en la transmisión de las señales a distancias largas. Cuando la temperatura ambiente es elevada (en casos, los clientes especifican temperaturas ambientes del orden de los 100 °C) la disipación de la potencia térmica generada en los 12 transistores de salida podría representar un grave inconveniente.

Este inconveniente desaparece mediante un diseño adecuado del tacómetro digital, con una ejecución robusta que proporcione una amplia superficie de refrigeración. La figura 15 muestra un tacómetro digital en ejecución "heavy duty", previsto para su empleo en condiciones duras de trabajo, con una protección IP 66 y un peso cercano a los 2 kg. Evidentemente, un codificador de estas características tiene unas prestaciones (y un precio) no comparables a los codificadores baratos del mercado. El usuario debe saber distinguir qué máquina precisa para su instalación y no decidir el codificador sólo en razón de su precio. Un receptor optoacoplador (ver esquema en la figura 16) mejora significativamente la protección contra tensiones peligrosas. Las señales peligrosas en modo común en los conductores de transmisión, elevan o reducen el potencial del diodo fotoemisor del optoacoplador con respecto a tierra, sin influir en la corriente que circula por el diodo y, por tanto, sin influir en la transmisión de datos al fototransistor.

El diodo Z es necesario con señales de nivel HTL. Las dos resistencias constituyen el extremo del cable y limitan la intensidad de corriente que circula por el diodo, formando, conjuntamente con el condensador, un filtro de paso bajo contra ondas de choque excepcionalmente altas y, consecuentemente, peligrosas. Del modo descrito, la modulación mutua posible entre los

conductores de transmisión, queda reducida a la pequeña capacidad parásita Cs.

La figura 17 muestra el aspecto físico de uno de estos optoacopladores a los que nos referimos, en una ejecución que prevé su instalación en railes normalizados, mientras que la figura 18 muestra una tarjeta convertidora de la señal digital en una corriente analógica, es decir, un convertidor frecuencia-intensidad, de frecuente utilización en aplicaciones a la salida de codificadores.

7. Corrientes parásitas inducidas en el eje

Como siempre que se avanza un paso en la técnica, surgen nuevos problemas a los que hay que enfrentarse.

El masivo empleo de codificadores en convertidores denunció un problema grave originado en los cojinetes de los motores del accionamiento, que sufrían rugosidades, impidiendo su correcto funcionamiento.

En efecto: los motores de más de 100 kW (o los que operan con convertidores de frecuencias altas) se ven sometidos al riesgo de corrientes parásitas inducidas en el eje, corrientes que, a partir de una densidad de aproximadamente 1 A/mm², pueden dañar los cojinetes formando estrías o acanalamientos.

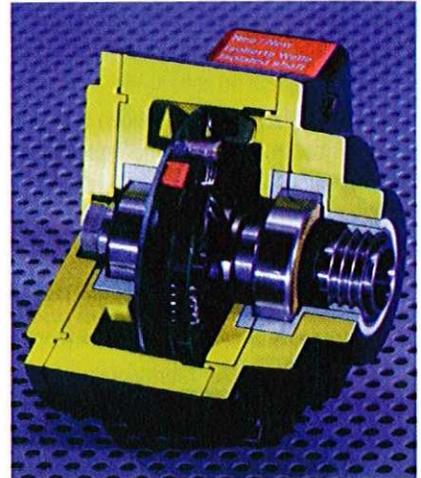


Figura 20

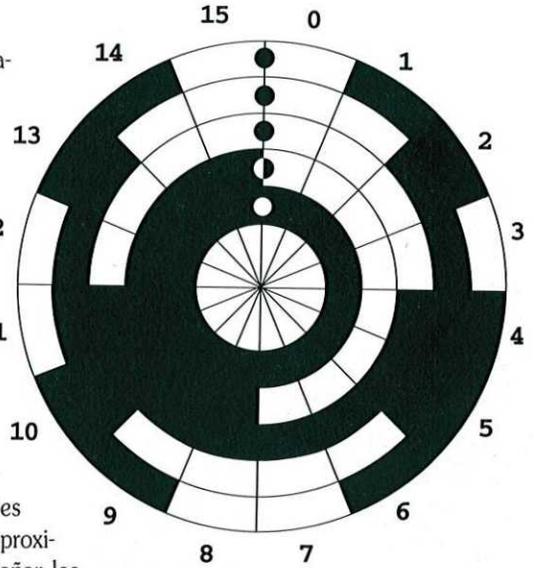


Figura 21

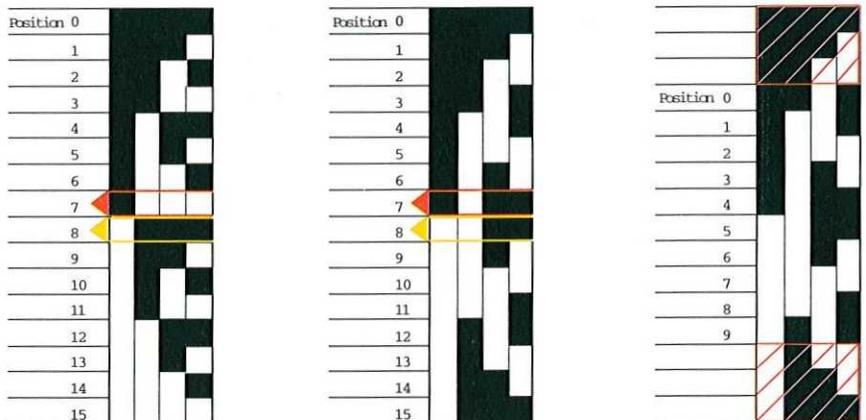


Figura 22

tos en la superficie de rodadura, como se muestra en la figura 19.

Entre los factores que pueden ser considerados como originarios de este problema, resumimos:

1. Asimetría del circuito magnético.
2. Acoplamiento capacitivo
3. Tensiones externas.

Naturalmente, los fabricantes se han esforzado por hallar soluciones a este gravísimo problema, entre las que destacamos los motores que utilizan cojinetes cuyo aro exterior está aislado con una delgada capa cerámica (TiO_2). Un motor de este tipo traslada el problema de las corrientes parásitas a los aparatos periféricos y, consecuentemente, a los codificadores.

En la figura 20 se muestra un codificador de eje hueco equipado con casquillos de cojinete aislados eléctricamente, los cuales mantienen alejadas las corrientes parásitas de los cojinetes y de la junta laberíntica. Consecuentemente, la carcasa del codificador puede ponerse a tierra y el bra-

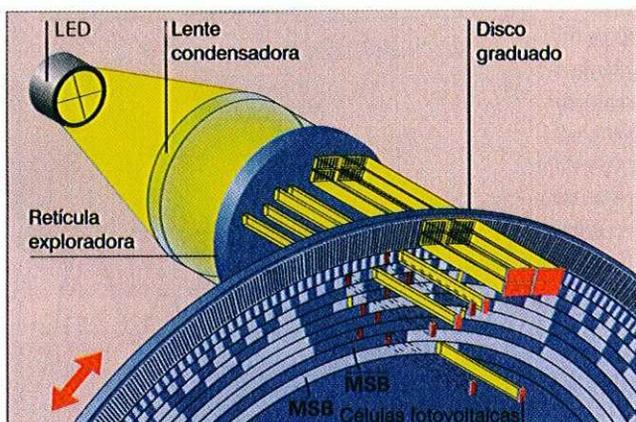


Figura 23

zo de soporte del par puede seguir siendo metálico.

En los generadores tacométricos analógicos y digitales, en ejecución con brida europea, el periférico se puede separar del eje del motor mediante un acoplamiento elástico, rígido a la torsión, el cual esté provisto del lado del periférico de un cubo de material sintético resistente a las altas

temperaturas. De este modo se aísla el problema de las corrientes parásitas.

8. Encoders absolutos

Algunos accionamientos necesitan que, después de aplicar la tensión de alimentación, se facilite inmediatamente una información relativa a la posición exacta del eje, sin que se produzca desplazamiento del accionamiento para la referencia-ción.

Es decir, en los codificadores incrementales con señal de referencia, la posición del eje podía siempre quedar determinada yendo al origen de dicha señal de referencia, es decir, rotando el eje hasta ponerlo en la posición cero. En los codificadores absolutos, vamos más allá y queremos saber de modo inmediato cuál es la posición en que se encuentra el eje, nada más aplicar la tensión de alimentación. Para ello precisamos otra técnica:

la que incluyen los codificadores absolutos, tacómetros digitales absolutos o, como se les conoce comúnmente, encoders absolutos.

El procedimiento de conversión absoluto se basa en una codificación con varios canales de lectura simultánea. A cada posición le corresponde una combinación determinada y única

de valores numéricos absolutos, que son almacenados en un disco, como, por ejemplo, muestra la figura 21.

Los codificadores absolutos transmiten los valores, habitualmente, según código binario puro, según código de Gray o según código de Gray exceso. En las tres figuras 22a, b y c, se aclaran estos conceptos.

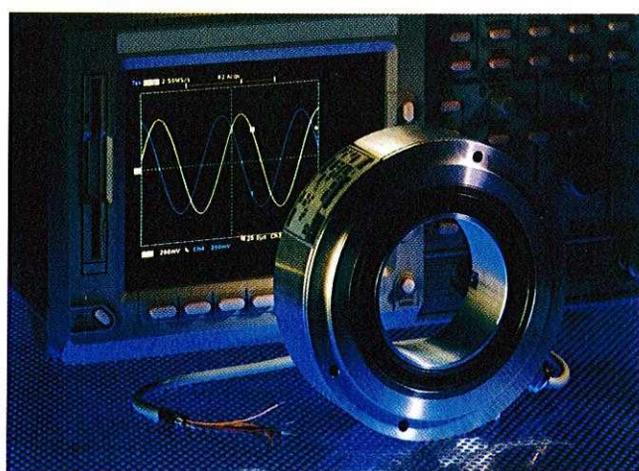


Figura 24

En el código binario puro (figura 22 a), el valor numérico se expresa con los exponentes de base 2. Así, por ejemplo, el número 227 se expresa:

$$1 \times 2^7 + 1 \times 2^6 + 1 \times 2^5 + 0 \times 2^4 + 0 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0$$

En otras palabras, el valor de 227 en código binario puro es 11100011. Un patrón típico en código binario puro está representado en la figura 21 a: durante el cambio de una posición ("7" en el ejemplo escogido) al siguiente valor de posición ("8"), puede variar de nivel lógico, como muestra la figura 22 a:

$$7 = 0111$$

$$8 = 1000$$

La característica esencial del código de Gray es su escalonado en unidades de distancia, esto es: entre dos posiciones contiguas el valor de posición difiere exactamente en un dígito binario. Un patrón típico en código de Gray queda expresado en la figura 22b: Sólo existe una variación de nivel lógico, un dígito binario, durante el cambio de "7" a "8":

$$7 = 0100$$

$$8 = 1100$$

El código exceso Gray consiste en una sección del centro del código Gray patrón (figura 22c). Este código permite una cantidad de valores de posición diferente, de $2x$, pero sigue siendo un código de distancia unitaria. La resolución puede ser limitada, por ejemplo, a 360 posiciones angulares por revolución.

La figura 22c muestra un ejemplo de código exceso Gray: Un código Gray de 4 bits proporciona 16 valores de posición codificados (0001, 0100, 0110...). Para

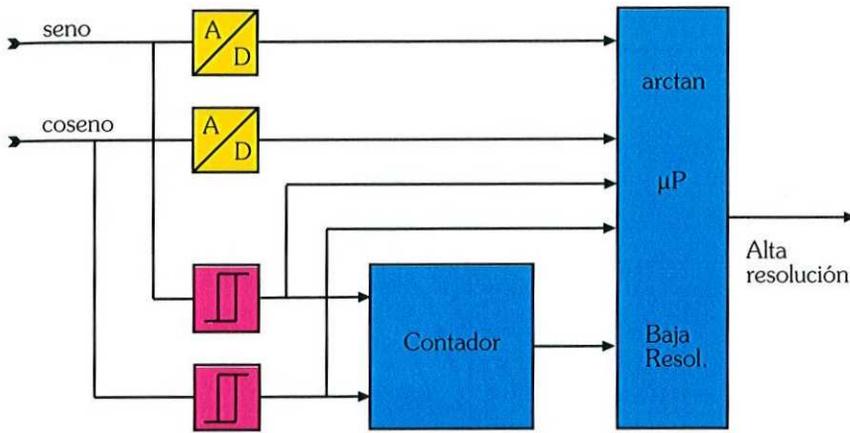


Figura 25

resolver solamente 10 valores de posición, el primero y los tres últimos valores codificados se omiten del patrón graduado, para producir un código 10-exceso-3.

Existen otros códigos de salida diferentes a los expuestos, como, por ejemplo, el Código BCD: En algunos casos la información procesada conviene que sea convertida al sistema decimal, para ser más fácilmente interpretada; de ahí la existencia de Códigos Decimales Binarios (BCD). En estos códigos cada número decimal se codifica directamente en un código binario. Para representar los diez dígitos del cero al nueve se precisan 4 bits, es decir, para cada década se necesitarán 4 bits

9. Codificadores absolutos monovuelta y multivuelta

El principio de funcionamiento de un codificador absoluto optoelectrónico se explica gráficamente en la figura 23.

En los codificadores absolutos monovuelta, una vuelta se divide en un determinado número de valores de posición, y transmite estos valores medidos en el código. Tras cada vuelta, se repiten los mismos valores.

Por el contrario, los codificadores absolutos multivuelta no sólo traducen una posición angular en una vuelta, sino que son capaces de discernir en qué vuelta se produce un determinado valor. Es decir, dan el valor codificado de la posición, más el valor codificado de la vuelta en la que se

encuentra el eje. Para lograr esta doble medición, el código Gray es más amplio y, además, el codificador debe estar provisto de medios ópticos, mecánicos o magnéticos, para codificar cada revolución.

10. Otro avance técnico: Tacómetro digital sinusoidal: *senoder*

Los modernos dispositivos de control digital procesan las informaciones - posición y velocidad, en accionamientos lineales, y posición del rotor y velocidad de giro, en accionamientos rotativos - con tiempos típicos de ciclo de 100 microsegundos para el control en tiempo real de la velocidad.

Con este dato de referencia, el dispositivo debe recibir 10.000 señales de la posi-

ción por segundo, por lo que la velocidad puede derivarse del índice de variación de la misma por unidad de tiempo.

Evidentemente, un codificador incremental con 2.500 impulsos por vuelta y cuadruplicación de los impulsos, contando los frentes de impulsos, puede proporcionar estas 10.000 señales por revolución. Sin embargo, a bajas velocidades, por ejemplo, 60 r.p.m., se presentan fenómenos de fluctuación que ocasionan vibraciones (micropasos) del eje de accionamiento. Como ya dijimos, los resolvers no son una solución adecuada.

El control de la velocidad de giro por debajo de 1 r.p.m. requiere más de 106 muestras por revolución, valor que actualmente sólo puede alcanzarse con codificadores sinusoidales precisos, como el que se muestra en la figura 24.

Dos señales sinusoidales desfasadas entre sí 90° (seno y coseno) contienen una información de amplitud dependiente del ángulo, a partir de la cual puede derivarse la información de posición, y ello se consigue con una mayor resolución que la que proporciona simplemente el número de veces que pasan por cero las dos señales sinusoidales.

La figura 25 muestra el principio del método de medida de alta resolución. La posición aproximada se evalúa a partir de los pasos por cero de las señales de seno y coseno, como sucede en los codificadores

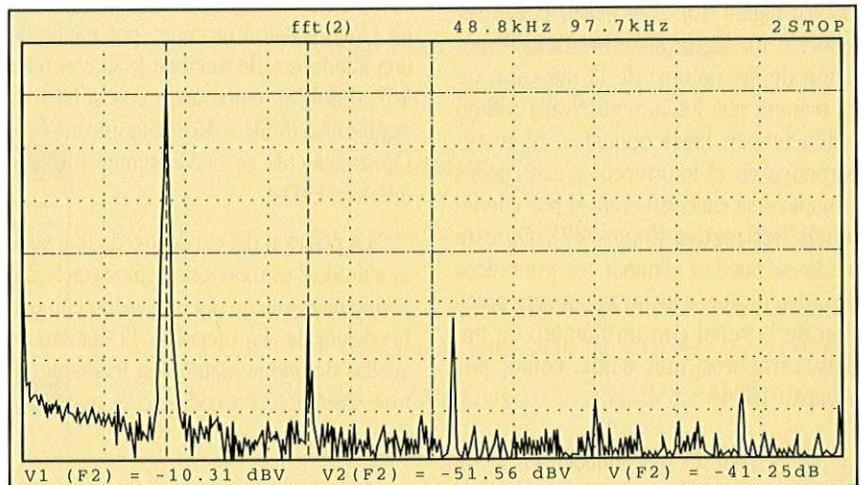


Figura 26

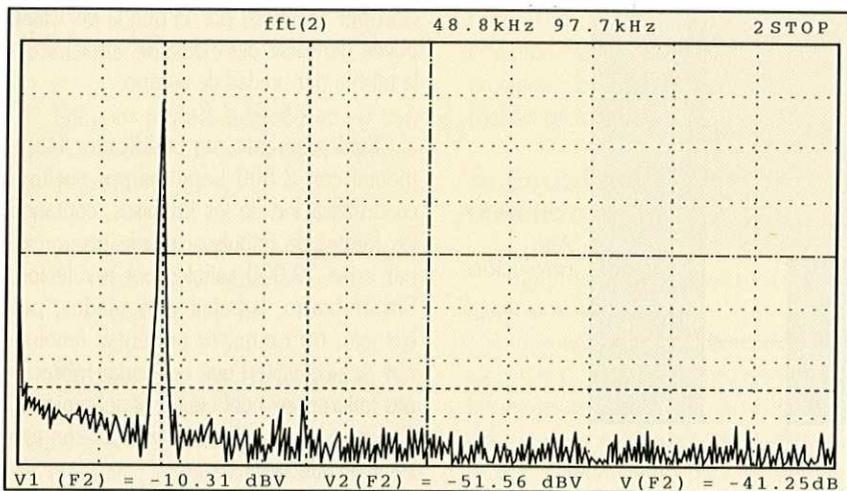


Figura 27

incrementales. La posición fina se obtiene a partir del arco tangente de las señales muestreadas y digitalizadas. Para combinar la información de posición y fina y obtener una señal de alta resolución, es necesario considerar los estados lógicos de los comparadores, para determinar el cuadrante matemático correcto. De este modo es posible subdividir 4.096 veces cada período de las señales sinusoidales en un ciclo único del dispositivo de control.

La avanzada tecnología de estos codificadores comporta también unas desventajas, entre las cuales se encuentra la presencia de armónicos en la señal de salida. Si se toma un codificador convencional, y se le aplica la tecnología desarrollada para la obtención de una salida sinusoidal, nos encontramos con que están presentes en dicha señal hasta el 10º armónico (figura 26). Este efecto puede ser reducido mediante una cuidadosa disposición de las ranuras de la máscara, de tal manera que los armónicos del mismo orden tengan fases opuestas. Si se superponen en el fotorreceptor, los citados armónicos se cancelan entre sí por interferencia destructiva (figura 27). De este modo se pueden eliminar los armónicos de orden mayor, y lograr una mayor precisión de la señal con un número de impulsos (ranuras) más bajos, como, por ejemplo, 1024.

Otros factores que influyen en la reducción de armónicos son el control de la excentricidad del disco de impulsos, que

puede reducirse a tan sólo unos pocos mm, mediante técnicas de fabricación avanzadas, y mediante la compensación en temperatura y control electrónico de la intensidad de corriente de los LEDs de exploración.

11. Non plus ultra: codificadores absolutos/sinusoidales

Como colofón de este trabajo de divulgación de modernos transductores para accionamientos altamente dinámicos, terminamos mostrando un generador de señal multivuelta absoluto (figura 28), muy robusto y de alta resolución con 8.192 pasos (13 bits) por vuelta y 4.096 vueltas distinguibles (12 bit).

Los datos de posición absoluta, en total 25 bit, se transmiten en forma de código Gray digital al receptor, por medio de una interface serie síncrona (SSI) con nivel TTL (RS-422), empezando con el bit más significativo (MSB = *Most Significant Bit*). Opcionalmente se puede suministrar una interface EnDat.

La posición del eje dentro de una vuelta individual se monitoriza optoelectrónicamente mediante un disco de vidrio con una hendidura de alta precisión. El número de vueltas del eje se determina mediante un tren mecánico con codificación magnética de la posición.

Para la regulación de la velocidad de rotación del accionamiento en tiempo real

se dispone de dos señales analógicas de forma sinusoidal, con 512 períodos por vuelta, un desfase de 90° y un nivel de señal de 1 V punta-a-punta. Esto supone que un codificador absoluto se puede utilizar en una aplicación que requiera tanto el control de posición absoluta de eje como de su velocidad. Nos encontramos ante un codificador Heavy Duty que combina esta robustez con las prestaciones de los codificadores absolutos multivuelta.

Su aplicación se encuentra en máquinas e instalaciones con altas exigencias mecánicas, en las cuales no bastan las prestaciones de los codificadores absolutos ordinarios. Con estos codificadores absolutos/sinusoidales estamos en el punto más elevado del actual desarrollo de la regulación de accionamientos de alta dinámica, lo que justifica para nosotros que pongamos punto final a este trabajo.

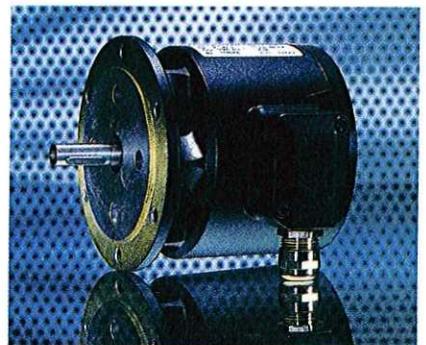


Figura 28

12. Agradecimiento

Para la confección de este trabajo hemos utilizado figuras de catálogos de las firmas Thalheim, Stegman, Heidenhain y **Hübner/Berlín**. Asimismo hemos bebido en las fuentes de interesantes trabajos expuestos por el Dr. **Wilhelmy**, de Hübner/Berlín, **Gerhard Vock**, de Thalheim, y del Dipl.-Ing. **Uwe Sawitzki** de **Hübner Elektromaschinen AG**. Para todos ellos, nuestra más sincera gratitud.

Los autores confían tener la posibilidad de informar a los nuevos lectores de Dyna, sobre el nivel de utilización y desarrollo técnico de los codificadores, 30 años después, tal como Puchol *senior* ha hecho sobre las dinamos tacométricas. ■