

POTENCIÓMETROS: DEFINICIONES TÉCNICAS.

1. Introducción	2
2. Terminología / Conceptos y Definiciones	2
3. Linealidad / Conformidad	3
3.1 Linealidad independiente	3
3.2 Linealidad absoluta	4
3.3 Conformidad absoluta	5
4. Resistencia de contacto	5
5. Errores de linealidad debidos al circuito eléctrico	6
6. Errores de linealidad debidos al acoplamiento mecánico	7
7. Definiciones de fineza	7
7.1 Fineza	7
7.2 Microlinealidad	8
7.3 Variación del gradiente relativo (RGV)	8
7.4 Interpretación del RGV	10
8. Resolución, histéresis, repetitividad y reproducibilidad	11
8.1 Resolución	11
8.2 Histéresis	11
8.3 Repetitividad	12
8.4 Reproducibilidad	12
9. Coeficientes de temperatura y humedad	12
10. Vida de servicio	13

1.- INTRODUCCIÓN

Los rápidos avances en el campo de la ingeniería de control y en las tecnologías de semiconductores y microprocesadores, han dado como resultado el uso generalizado de sistemas de control electrónico en todas las ramas de la industria. Esto ha creado la necesidad de sensores que resulten económicos al tiempo que robustos, tanto eléctrica como mecánicamente, soportando una amplia gama de temperaturas. Esto es particularmente relevante en aplicaciones que involucran grandes cantidades (tales como las de la industria del automóvil).

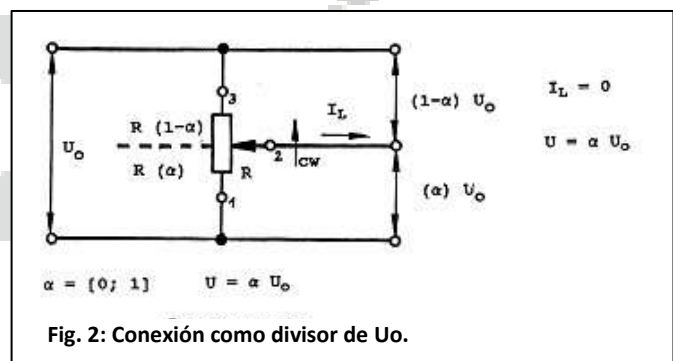
Este documento se refiere a los criterios de calidad aplicables a los potenciómetros de pista de plástico conductor en su uso como sensores de movimiento angular y lineal. Tales dispositivos comprenden esencialmente los siguientes componentes:

1. El elemento de resistencia (material de apoyo + una pista de resistencia de plástico conductor)
2. Una escobilla de contacto (aleación de metales preciosos)
3. Un eje de accionamiento o varilla actuadora
4. Unos cojinetes (rodamientos de bolas o cojinetes de fricción)
5. Una envolvente (cuerpo del dispositivo).

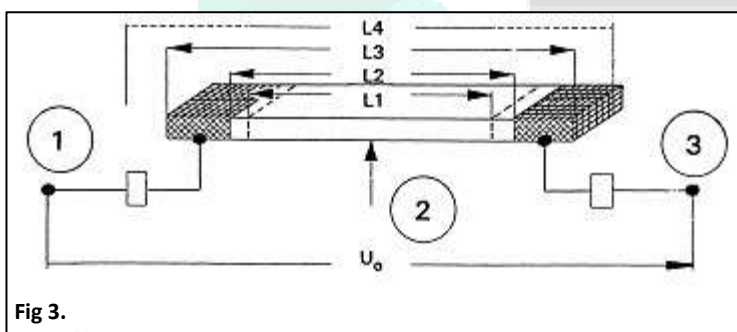
2. TERMINOLOGÍA / CONCEPTOS Y DEFINICIONES

Cuando nos referimos hoy en día a un potenciómetro como sensor, es importante tener en cuenta que las indicaciones hechas aquí sólo tienen sentido si el potenciómetro se conecta como divisor de tensión en lugar de como una resistencia variable (reóstato) (Fig.2).

La tensión de la escobilla debe ser conectada, libre de carga, a un amplificador operacional tal como un 741 o algún otro componente con una alta impedancia de entrada.



La Fig.3 explica los términos utilizados, como los recorridos eléctrico y mecánico. L1 indica el recorrido eléctrico nominal; L2 indica el recorrido de continuidad que también incluye los campos de conexión no lineales (fig. 4). L3 indica el recorrido total de contacto eléctrico del potenciómetro. L4 indica el recorrido mecánico, donde el potencial eléctrico no tiene que estar definido para todo el recorrido. A menos que se indique otra cosa, las zonas L1, L2, L3 y L4 están diseñadas de forma simétrica.



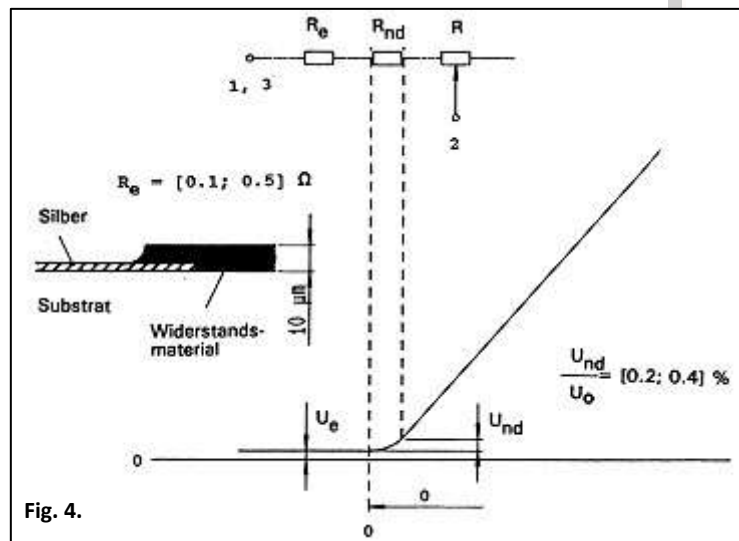


Fig. 4.

3. LINEALIDAD / CONFORMIDAD

De todas las características de calidad mencionadas, la linealidad y la conformidad son los valores que más a menudo se definen en la literatura existente. Estos términos expresan la medida en que la salida de tensión de un potenciómetro (y también otros tipos de sensor de movimiento angular o lineal), se diferencian de una función teórica prescrita. En la gran mayoría de los casos, la función de salida deseada es directamente proporcional al movimiento angular o lineal que constituye la función de entrada.

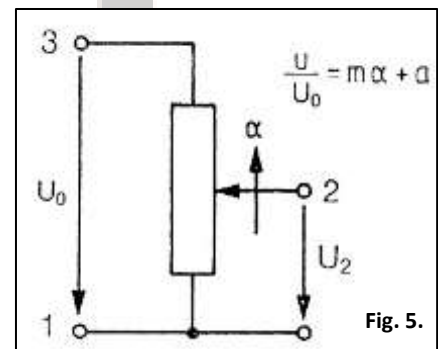


Fig. 5.

En la Fig. 5, se expresa la relación entre la tensión de salida del potenciómetro y el recorrido lineal o angular de su cursor, donde “m” caracteriza el gradiente. En este caso, donde la relación es lineal, la desviación respecto a una recta ideal (de pendiente “m”) se entiende como “linealidad”.

Cuando la relación es no lineal, como en un hipotético caso donde:

$$T = f(x) + a + b$$

la desviación se entiende como “conformidad”.

3.1 Linealidad independiente

Si se aplica un voltaje U_0 a un potenciómetro con una característica lineal como en la Fig. 5, y el cursor se mueve en la dirección α , la relación que existirá entre la tensión de salida y el valor mecánico de la entrada se ilustra en la Fig. 6. La desviación máxima de la curva de respuesta del potenciómetro respecto

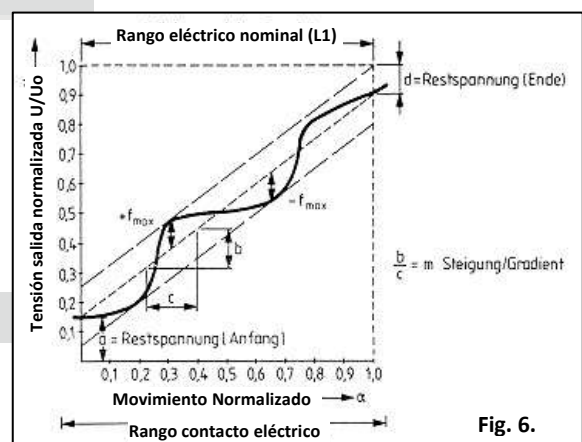
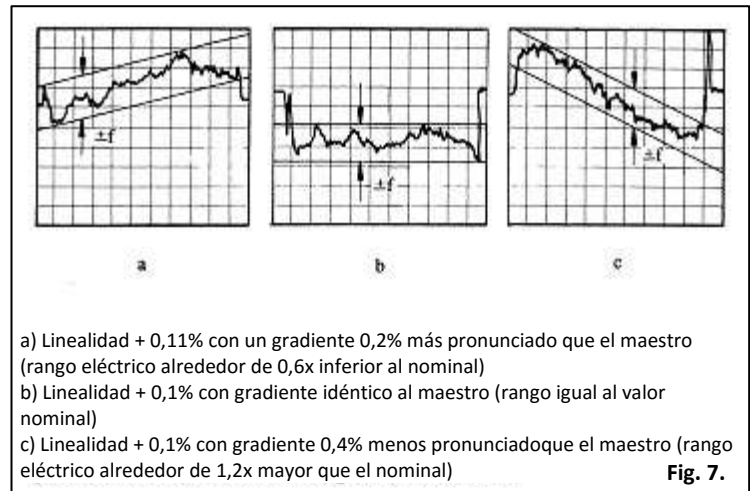


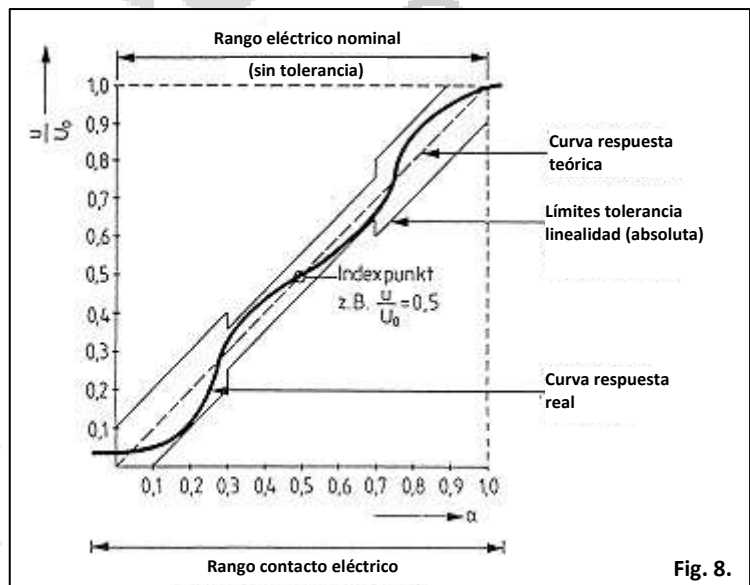
Fig. 6.

de la línea recta ideal se conoce como “error de linealidad independiente”. La pendiente y el punto de corte de esta recta con el eje, se elegirán de manera que el error f dentro de la carrera L_1 se reduzca al mínimo. El error de $\pm f$ se indica como una desviación en términos de porcentaje de la tensión teórica de salida en relación con la tensión de entrada. Dado que la medición directa de la característica del potenciómetro hace que no sea posible evaluar el alcance de este tipo de error, sólo se contrasta gráficamente la diferencia entre la característica del potenciómetro y la de un potenciómetro maestro (esencialmente “perfecto”), como en el ejemplo práctico de la Fig. 7. Los valores típicos para linealidad independiente se encuentran hoy en día entre 0,2% y 0,02%.



3.2 linealidad absoluta

Con la automatización cada vez mayor de las cadenas de montaje, los usuarios están encontrando que el dato de linealidad absoluta está ganando importancia poco a poco. A diferencia de la linealidad independiente, para la linealidad absoluta, la pendiente de referencia queda completamente definida (Fig. 8), de modo que ya no hay necesidad de que el sistema tenga que ajustarse posteriormente (una vez el sensor integrado). La definición de un punto de referencia establece una relación entre el valor de entrada mecánico (carrera o ángulo) y la tensión de salida.



Así pues, los potenciómetros cuya linealidad se defina por este criterio, pueden ser instalados sin necesidad de un ajuste posterior. Al igual que con la linealidad independiente, el mejor modo de determinar la linealidad absoluta de un potenciómetro es mediante la comparación de su salida con la de un potenciómetro de referencia (maestro).

Para la linealidad absoluta, a menudo es necesario que las tolerancias se expresen por tramos. En la Fig.9 se muestra un ejemplo práctico.

3.3 conformidad absoluta.

Como ya se ha indicado en el punto 3, la conformidad es un concepto más amplio que el de linealidad. La definición de la conformidad absoluta es similar a la dada para la linealidad absoluta. Es esencial que se defina un punto de referencia.

La relación funcional puede ser determinada matemáticamente o mediante el trazado de una serie de puntos que definan una curva con ayuda de la interpolación adecuada.

También es posible conseguir mediante un potenciómetro respuestas de incremento o decremento constante con funciones tales como las funciones logarítmicas, exponenciales, sinusoidales o cosinusoidales.

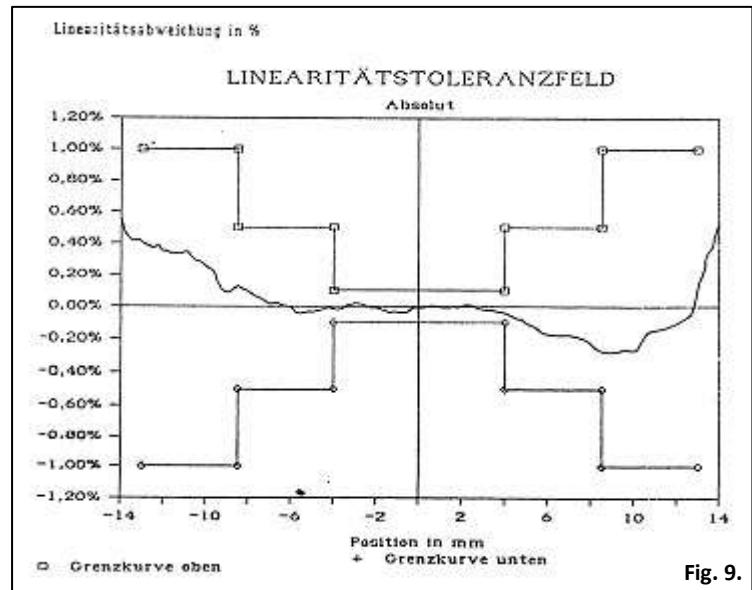


Fig. 9.

4. RESISTENCIA DE CONTACTO.

La resistencia de contacto es la resistencia entre el terminal donde está conectado el cursor y el punto de contacto más próximo a la escobilla en la pista resistiva del potenciómetro. Como se explicará posteriormente, esta resistencia de contacto afecta a todas las características importantes de la calidad de un potenciómetro.

La resistencia de paso o de contacto se puede dividir en tres componentes:

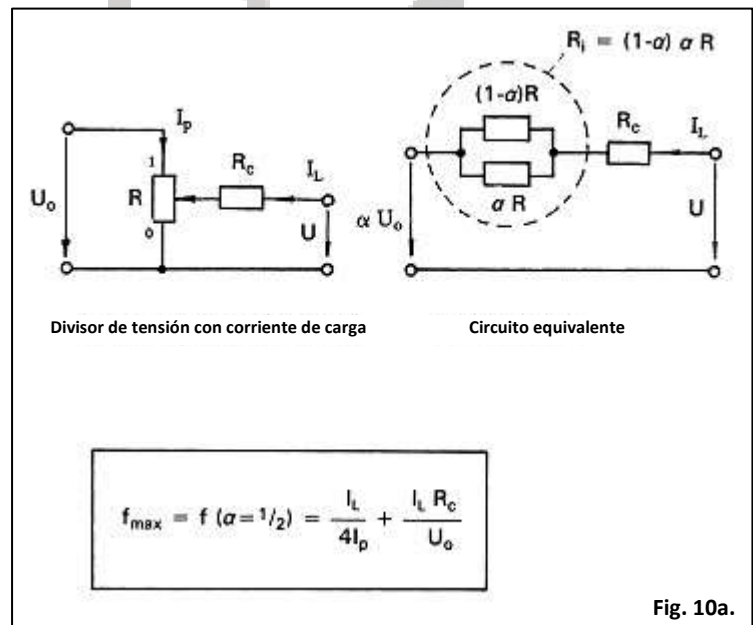
La primera de ellas describe la caída de tensión interna entre la pista conductora de corriente y la superficie de contacto. Este componente depende en gran medida de factores tecnológicos y asciende a varios cientos Ohm.

El segundo componente, el componente externo, es mucho más difícil de controlar que el primero. Esta resistencia de paso externa tiene mucho en común con las resistencias de contacto que se dan en conmutadores y conectores. Es causada por la transición entre la escobilla y la pista, no siendo ideal desde el punto de vista eléctrico. Los óxidos metálicos, cloruros y sulfuros, mezclados con diferentes sustancias orgánicas, pueden dar lugar a la formación de delgados revestimientos no conductores en la interfaz. Si no se mantiene dentro de unos límites, esta resistencia de transición externa puede, en condiciones desfavorables, hacer imposible el mantenimiento de la tolerancia dentro de los márgenes deseados. Es absolutamente esencial que los materiales utilizados en la fabricación del potenciómetro estén sometidos a estrictos controles de calidad y sean emparejados correctamente.

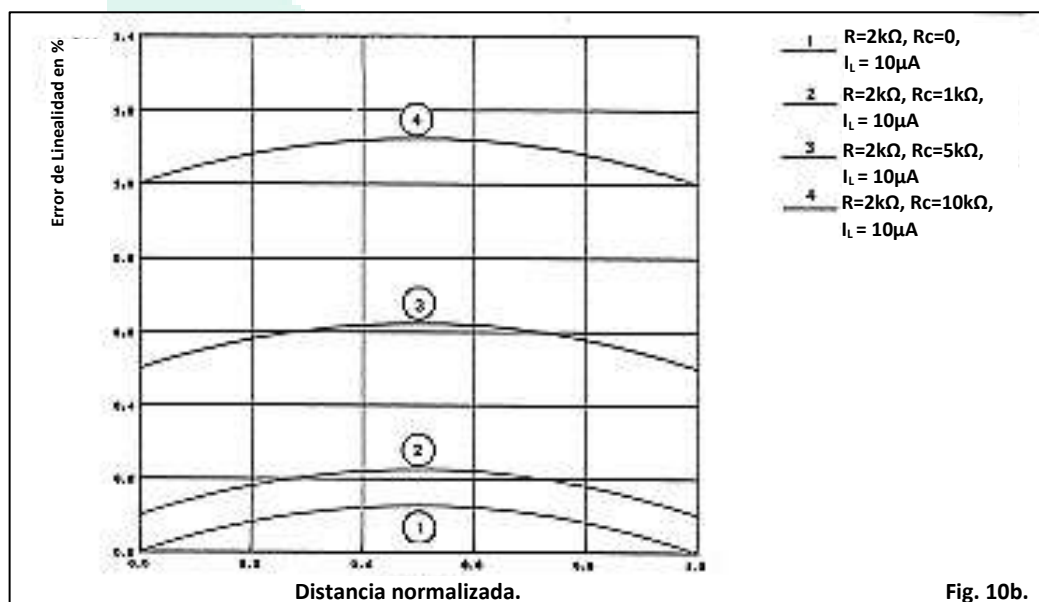
El tercer componente, el dinámico, está relacionado con las fuerzas variables que actúan sobre la escobilla a altas velocidades de accionamiento. Con la ayuda de escobillas amortiguadas, se pueden conseguir velocidades de accionamiento de hasta 10 m/s sin ningún incremento apreciable en el componente dinámico de la resistencia de contacto.

5. ERRORES DE LINEALIDAD DEBIDOS AL CIRCUITO ELÉCTRICO.

En este punto, sólo haremos referencia a características lineales (linealidad). Para aplicaciones con características no lineales (conformidad), las relaciones deberán ser adaptadas adecuadamente, aunque no hay diferencias esenciales. Como ya se mencionó en la sección 2, los valores de linealidad sólo pueden considerarse siempre que la señal entregada por el sensor "potenciómetro" conlleve una corriente virtualmente nula. Si consideramos el efecto de la corriente a través de la escobilla sobre la linealidad, vemos en la fig. 10a, la



relación funcional entre esta corriente, la resistencia de contacto y el error de linealidad. Como se muestra en el ejemplo de la Fig. 10b (Característica 4), con una corriente de escobilla de 10 µA y una resistencia de contacto de 10 kΩ, un potenciómetro con una resistencia nominal de 2 kΩ, ya tiene un error de linealidad del 1.1%. Con una carga resistiva se presenta una situación similar. Esto muestra claramente la importancia que tienen tanto la corriente de cursor como la resistencia de contacto.



6. ERRORES DE LINEALIDAD DEBIDOS AL ACOPLAMIENTO MECÁNICO

Si hay una desalineación axial (excentricidad) entre el eje de accionamiento y el eje de un potenciómetro utilizado para detectar movimiento angular, se producirá un error de linealidad que aumenta a medida que el radio de acoplamiento en relación con el grado de excentricidad disminuye.

La siguiente ecuación determina el error relativo máximo:

$$F_{\max} = E / \pi \cdot r_k$$

(donde E = Excentricidad y r_k = el radio de acoplamiento).

Sólo es posible sacar el máximo provecho de la linealidad o la conformidad de cualquier sistema de sensores angulares, si los errores de alineación de acoplamiento (offset y angular) se evitan o, al menos, se reducen al mínimo. Esto significa que, para sistemas de medición de alta precisión, deben tomarse las medidas necesarias para minimizar cualquier desalineación en el acoplamiento de acuerdo con la ecuación anterior.

7. DEFINICIONES DE FINEZA.

Cuando hace unos 60 años se introdujeron por primera vez en el mercado los potenciómetros de plástico conductor, era evidente que, si bien los saltos de espira característicos de los potenciómetros de hilo bobinado se habían superado, no se podía lograr una suavidad absoluta de la tensión de salida. Después de algunas investigaciones básicas de H. Wormser, se incluyó el término "fineza" (smoothness) en la norma emitida por el Instituto de Componentes de Resistencia Variable (VRCI). Aunque esta definición era adecuada en ese momento, ya no puede servir como una definición del sistema en muchas de las aplicaciones. Esto se debe a que ahora es posible producir potenciómetros con apreciablemente mejores valores de fineza y de linealidad. Por esta razón, Novotechnik ha desarrollado en los últimos años definiciones más adecuadas para el estado actual de la técnica. Los diferentes métodos utilizados son discutidos y evaluados a continuación.

7.1 Fineza

Fineza es una medida de las desviaciones respecto a una regularidad perfecta (ideal) que aparecen en la tensión de salida de un potenciómetro. Esta irregularidad se mide durante un incremento del desplazamiento especificado, por ejemplo del 1%, y se expresa como un porcentaje de la tensión aplicada. Para la medición de la fineza, la definición del VRCI requiere el uso de un filtro de paso de banda como un medio de supresión de cualquier error de linealidad, y que el potenciómetro sea operado con una resistencia de carga. Este método tiene ciertas desventajas:

- a) El uso de un filtro hace que tanto la velocidad absoluta de la escobilla como cualquier cambio en tal velocidad afecte a los valores de fineza. Puesto que el filtro en parte integra y en parte diferencia, la curva de fineza registrada no indica con precisión las variaciones en la señal de salida.
- b) La carga aplicada al potenciómetro también contribuye al error, causando una variación en la resistencia de contacto que es mayor cuando el cursor está en el extremo donde se aplica la tensión y más baja cuando se encuentra en el extremo de la pista del potenciómetro conectado a tierra.

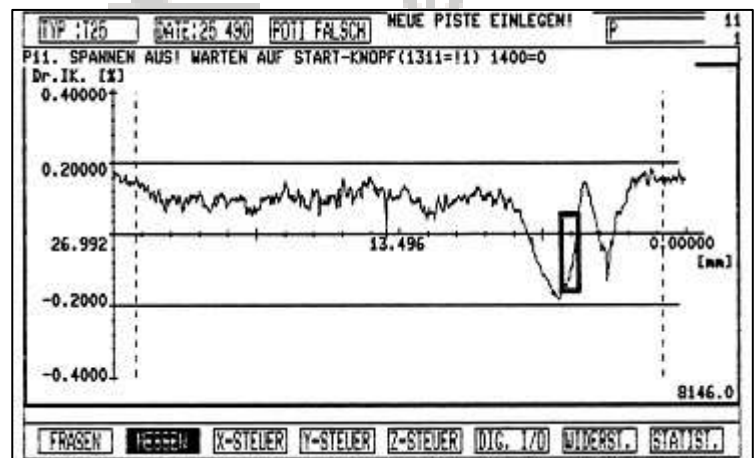
c) Una ventana de evaluación del 1% no es lo suficientemente precisa para muchas de las aplicaciones de hoy en día.

d) La selección del tipo de filtro, a veces arbitraria, la resistencia de carga y el incremento del desplazamiento, resulta en valores de fineza que no son directamente comparables entre ensayos.

7.2 Microlinealidad.

En 1978, Novotechnik introdujo el término Microlinealidad, que se define como la variación máxima de la linealidad dentro de un desplazamiento o incremento angular que asciende (como con la medición de la fineza) al 1% del rango eléctrico, si no se define otra cosa. La Microlinealidad se indica como un porcentaje de la tensión absoluta que se aplica.

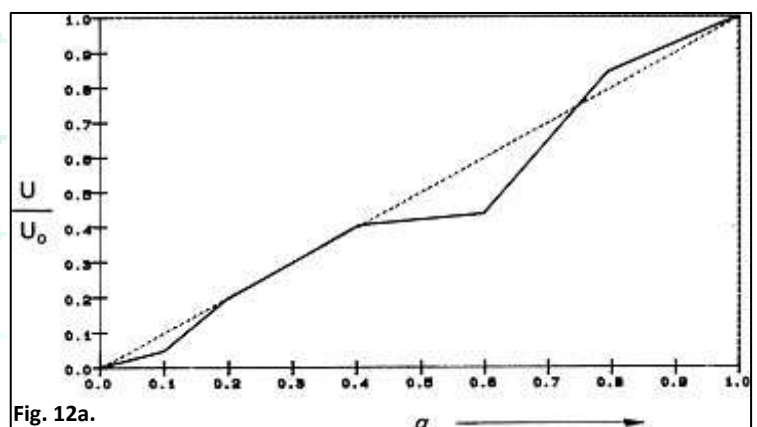
La Fig. 11 ilustra la característica obtenida para un potenciómetro con un error microlinealidad. Ésta fue obtenida por un sistema asistido por ordenador al hacer mediciones de linealidad. Los incrementos de recorrido son superpuestos sobre la curva de linealidad con un solapamiento de al menos el 50%. Contrariamente a la medida de la fineza, el error aquí es puramente un error de linealidad que describe el error máximo en un incremento definido.



La Microlinealidad no permite, sin embargo, determinar si un potenciómetro será adecuado para una aplicación concreta, porque cualquier variación en el gradiente (sensibilidad) sólo se podría determinar con una dificultad considerable.

7.3 Variación del gradiente relativo (RGV)

Si, en un sistema de control de alta sensibilidad, la amplificación (ganancia de lazo) se ajusta, por ejemplo, de modo que el circuito de control sea estable con la pendiente media (gradiente) del sensor, entonces será importante controlar cualquier variación que pueda haber en la pendiente (Fig. 12a, Fig. 12b). Si, en cualquier momento, el gradiente es sensiblemente mayor que la pendiente media, entonces habrá una ganancia de lazo cerrado superior en esta posición, lo que podría dar lugar a una oscilación de retroalimentación. Si, por otra parte, el gradiente es menos pronunciado que el gradiente medio en algún punto, entonces la repetitividad se reducirá y habrá una



menor precisión en el control. Si relacionamos este tipo de variación del gradiente local g_L con el gradiente medio del potenciómetro g_o , el valor resultante será independiente de la longitud del dispositivo y se podrá utilizar para la comparación directa de varios potenciómetros:

$$RGV = \frac{\text{Gradiente Local}}{\text{Gradiente Medio}} = \frac{g_L}{g_o}$$

El RGV se indica como una desviación \pm en términos porcentuales a partir de L (gradiente medio estandarizado).

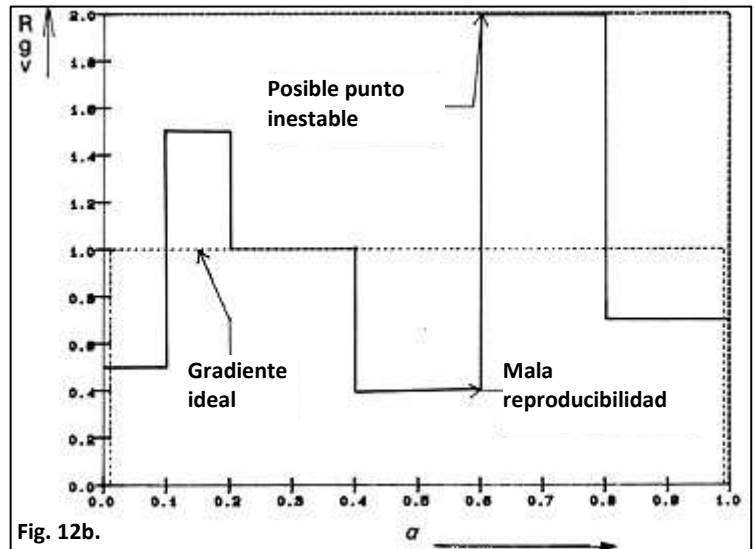


Fig. 12b.

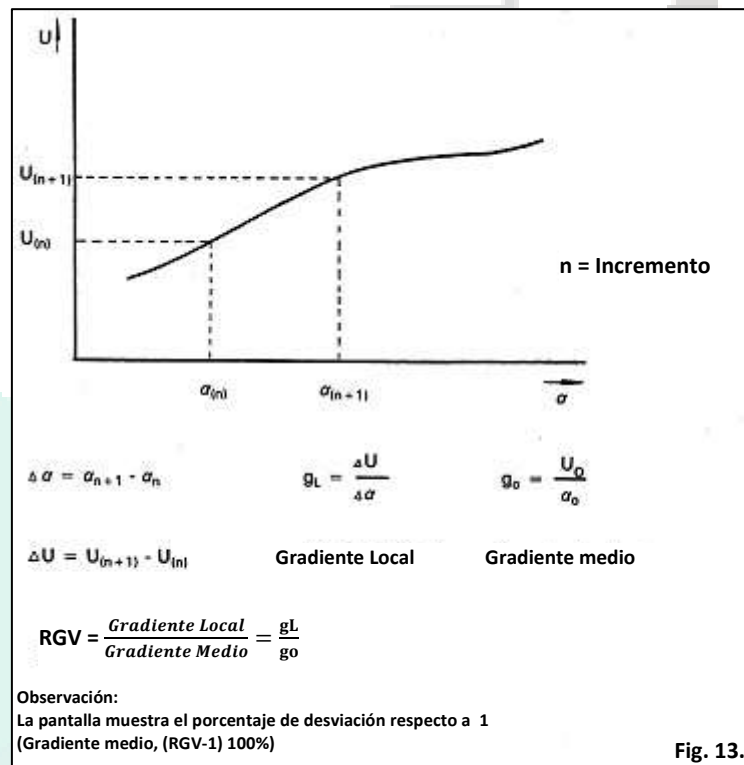


Fig. 13.

7.4 Interpretación del término RGV

Diversas mediciones han demostrado que con los potenciómetros de plástico conductor, las fluctuaciones de gradiente en incrementos de recorrido de menos de 1 micra se distribuyen al azar, es decir, que no hay una periodicidad o regularidad. La Fig. 14a muestra una curva de RGV y la Fig. 14b, los valores del RGV con anchuras de paso de 0,1°, 0,2° y 0,3°. La forma de estas distribuciones coincide aproximadamente con una distribución normal, lo que es previsible en base al principio del límite del valor central. El valor medio de la distribución es de alrededor de 1 (gradiente medio) y la varianza (DESVEST) disminuye a medida que aumenta anchura de los pasos. Puesto que cada valor RGV individual de la distribución representa un valor medio, es de esperar que la varianza de estos valores medios disminuya con una función de raíz cuadrática en relación al aumento del tamaño del paso, ya que cada uno de tales aumentos equivale a un aumento del tamaño de la muestra aleatoria:

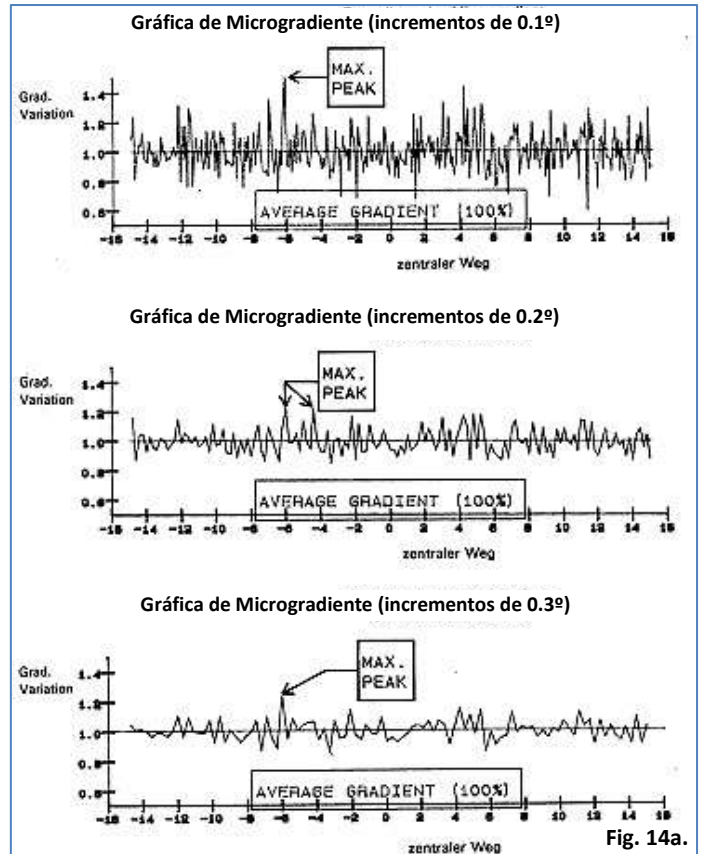


Fig. 14a.

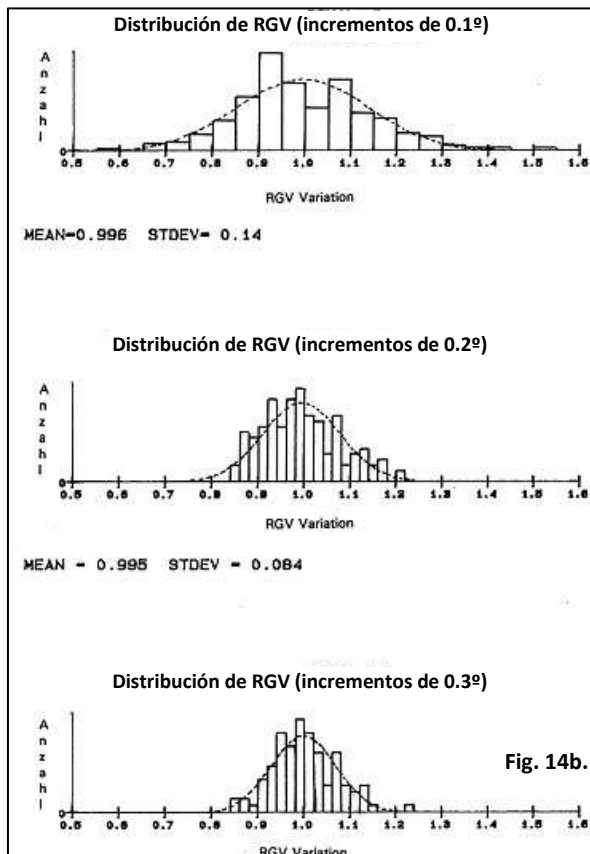


Fig. 14b.

$$\frac{RGV(X)}{RGV(Y)} = \sqrt{\frac{Y}{X}}$$

En la Fig.15 esta variación se ha trazado como una función de la anchura de paso. La varianza de RGV

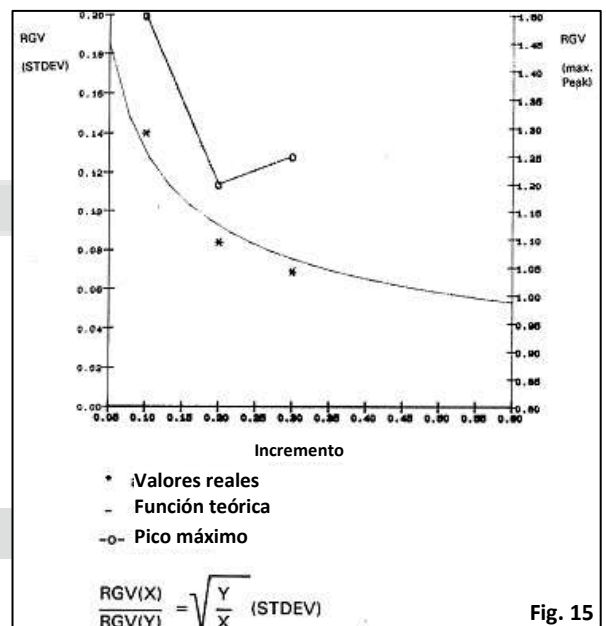


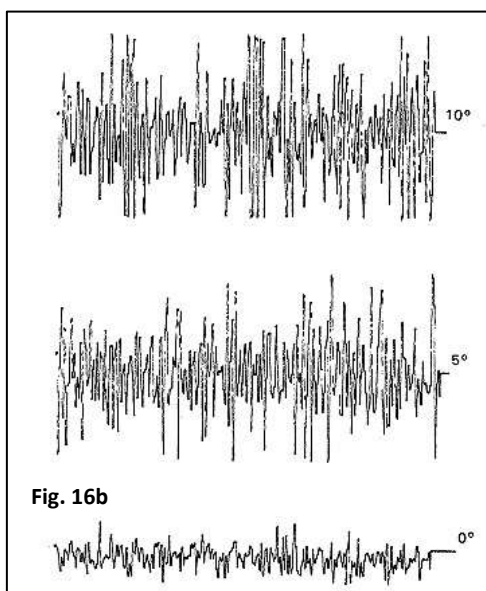
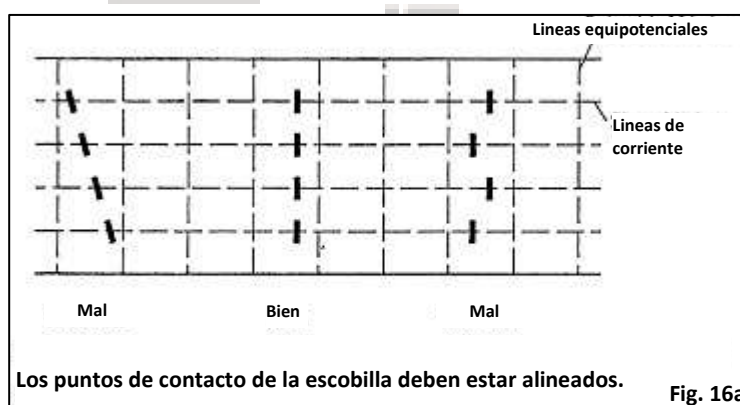
Fig. 15

puede por tanto ser considerada como un rasgo característico de la calidad de un potenciómetro. La relación funcional también sirve para indicar que la resolución máxima de un potenciómetro no es infinita, como se suele dar a entender. Los valores máximos de RGV también han sido trazados en la Fig.15. Esta curva, como la curva de valor mínimo, no corresponde a las leyes estadísticas, sino que es el resultado los defectos y errores del sistema (potenciómetro) en su conjunto. Estos valores son los criterios esenciales para evaluar la estabilidad y la repetitividad que se puede esperar de un sistema de control.

8. RESOLUCIÓN, HISTÉRESIS, REPETITIVIDAD Y REPRODUCIBILIDAD

8.1 Resolución

Cuando se miden los valores de RGV de potenciómetros hasta tamaño “synchro 20” producidos en serie, con anchuras de paso de 0.1° se obtienen valores de RGV de $\pm 10\%$. Si especificamos un valor para RGV de $\pm 100\%$ como límite de resolución, según las ecuaciones del apartado 7.4 obtenemos para un 10% , una resolución de $1/1000^\circ$. El grado de resolución viene determinado principalmente por la homogeneidad y distribución de tamaño de grano en la capa de plástico conductor, por el paralelismo de la superficie de contacto de la escobilla a las líneas equipotenciales (Fig. 16a, 16b) y por la corriente que la atraviesa.



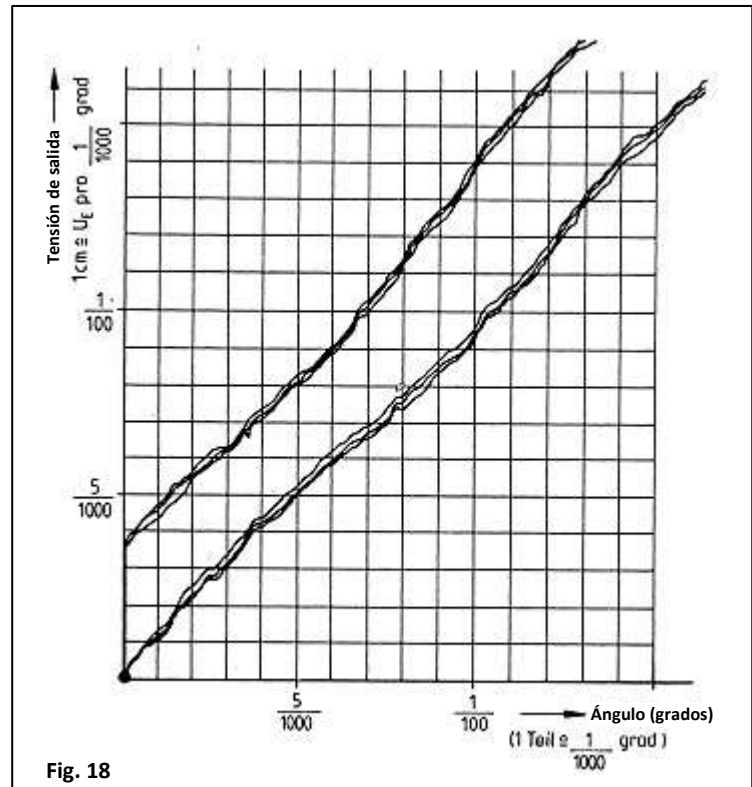
8.2 Histéresis

El valor de histéresis especifica las diferencias en la señal de salida según si una posición prescrita se aborda desde un lado o desde el otro. La histéresis es influenciada principalmente por factores mecánicos tales como los cojinetes, la rigidez del sistema de escobillas o el coeficiente de fricción entre la capa conductora y la escobilla misma. Por esta razón, se debe prestar atención para asegurar un acoplamiento mecánico sin holguras y rígido. Esto se puede lograr usando, por ejemplo, una punta de contacto cónica con un resorte de palanca. La Fig. 18 muestra la histéresis registrada en un potenciómetro Novotechnik estándar. Las mediciones se tomaron en sentidos de rotación horario y antihorario y se repitieron tres veces. Mientras que las curvas registradas en una dirección casi coinciden (lo que indica una buena resolución), en la dirección opuesta indican una histéresis de alrededor de cuatro milésimas de grado. El hecho de que las curvas en una misma dirección casi

coincidan y de que haya una histéresis constante en la dirección opuesta indica un desplazamiento estable de la línea de contacto de la escobilla, lo que significa que no hay efecto “stick-slip”.

8.3 Repetitividad

Este término se confunde generalmente por el de reproducibilidad. Por repetitividad nos referimos a la consistencia de las salidas obtenidas mediante cualquier movimiento de aproximación hacia una posición prescrita, desde la misma dirección.



8.4 Reproducibilidad

Este término denota la consistencia de las lecturas obtenidas mediante cualquier movimiento de aproximación hacia una posición prescrita desde varias direcciones. Equivale a la suma de 2 x resolución + histéresis.

9. COEFICIENTES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD

En muchas hojas de datos emitidas por los fabricantes de potenciómetros, con frecuencia se hace referencia al coeficiente de temperatura (CT) y al coeficiente de humedad (Fk) de la resistencia nominal, pero cuando se utilizan los potenciómetros como divisores de tensión (Fig. 2), estos valores resultan irrelevantes.

Para estas aplicaciones, los parámetros relevantes para el comportamiento son los factores Tk y Fk aplicables al divisor de tensión mismo. A menudo también ocurre que la humedad no se mantiene constante, mientras se hacen las mediciones de Tk, con un resultado que resulta una mezcla de Tk y Fk y que se da entonces simplemente como un coeficiente de temperatura.

Mediciones detalladas hechas por Novotechnik han demostrado que el Tk y Fk de la resistencia nominal de los potenciómetros de plástico conductor (sin envoltorio) son del orden de, 200 ppm /°C y 500 ppm /% HR, respectivamente (algo menores, en realidad). Los Tk y Fk del comportamiento del divisor de tensión son, aproximadamente, dos órdenes de magnitud inferiores, lo que significa que aquí los cambios que se pueden esperar son menores a 5 ppm/°C y 5 ppm/% RH, asegurando la consistencia en un amplio rango temperatura y de humedad. Sin embargo, esta ventaja sólo puede ser

aprovechada mediante una envolvente adecuadamente diseñada y si, por ejemplo, no se utilizan resistencias de ajuste en el circuito del potenciómetro.

10. VIDA DE SERVICIO

La magnitud de la resistencia de contacto, el desgaste al que se somete la pista de resistiva y el cambio resultante en las características eléctricas, determinan el número de operaciones a las que un potenciómetro puede ser sometido y por lo tanto también su vida útil.

A pesar de la considerable importancia que esto tiene para aplicaciones industriales, no hay hasta la fecha un estándar que especifique

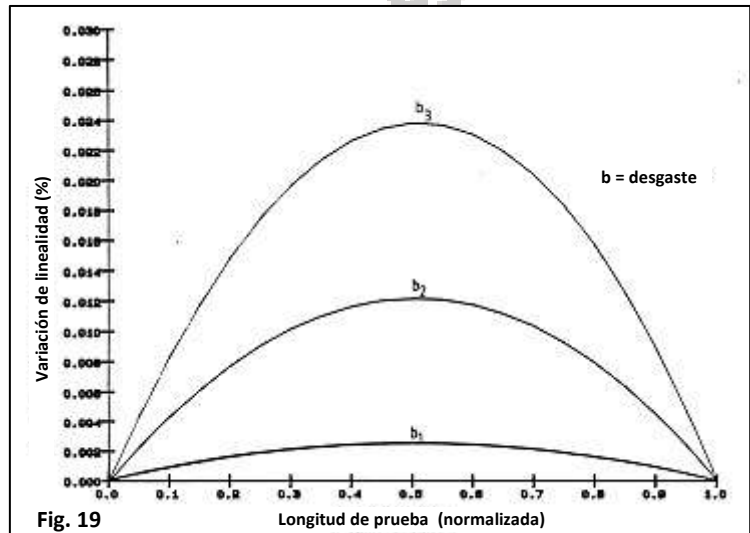


Fig. 19

una definición de vida útil o un método particular para su prueba. Es, por supuesto, más difícil de especificar un valor para el desgaste o para el aumento de la resistencia de contacto para un número dado de ciclos de accionamiento, puesto que dichos valores están marcadamente influenciados por factores externos tales como la temperatura y la humedad, además de por factores mecánicos y químicos.

Así pues, tales valores se deben establecer para cada aplicación en particular. Esto se afronta en menor medida mediante métodos de ensayo, y aquí el establecimiento de un procedimiento estándar facilitaría la comparación de la vida útil de varios potenciómetros. A menos que el cliente especifique algún procedimiento diferente, Novotechnik ahora utiliza dos tipos de prueba. El primero consiste en una prueba práctica en la que se simulan movimientos extremadamente pequeños de las escobillas, tal y como se producen con frecuencia en los sistemas de control retroalimentados. En este ensayo, el valor típico del desplazamiento es de 2°, a una frecuencia de 100 Hz. Esta prueba de oscilación permite una obtención relativamente rápida de resultados en lo referente a la fiabilidad del contacto y cualquier cambio del gradiente dentro de un “micro rango” ya que, a una frecuencia tan alta, pueden efectuarse diariamente unos 8,6 millones de ciclos.

La segunda prueba, la prueba de la “media carrera”, da información relativa a los cambios de linealidad, desplazamiento del punto cero y desgaste de la escobilla. Esta prueba se realiza a una frecuencia de 10 Hz (0,86 millones de ciclos por día) sobre el 50% de la longitud de la pista. Como se muestra en la Fig. 19, estas condiciones de trabajo producen una variación máxima de la linealidad. Un criterio de rechazo aquí podría ser una duplicación de la linealidad en relación al estado inicial (nuevo) y un valor máximo admisible de la resistencia de contacto.