

## Máquinas de medir por coordenadas

### Introducción

El concepto de control es parte fundamental e integrante de una moderna producción industrial. Hablando en general, los componentes mecánicos son parte de conjuntos y subconjuntos, debiendo por lo tanto satisfacer niveles de calidad bien definidos. En el campo dimensional esto significa respetar las tolerancias de fabricación establecidas por el proyectista. La creciente demanda de intercambiabilidad entre las mismas piezas, aunque producidas en lugares y con máquinas diferentes, la necesidad de reducir los costos totales de producción y de mejorar las prestaciones del producto, son buena razón para organizar Centros de Control de Calidad versátiles y para ampliar aún más el campo de sus aplicaciones y posibilidades.

Las máquinas de medición por coordenadas fueron desarrolladas al comienzo de la década del sesenta con la idea de dar una mejor solución a los requisitos antedichos, sin los inconvenientes de los métodos de medición tradicionales, tales como:

- Necesidad de frecuentes reposicionamientos de la pieza para acceder a sus varios lados a medir.
- Tiempo empleado en efectuar la lectura de escalas grabadas.
- Insuficiente precisión del equipo de medición.
- Errores de operación y de sistema.

La solución a estos problemas se obtuvo por medio de una estructura mecánica que permitía el libre movimiento de un cabezal de medición, equipado con puntas de medición o palpadores, dentro de un cierto volumen paralelepípedo. Las coordenadas que definían la posición del cabezal, eran detectadas continuamente por tres transductores y mostradas en un display digital o impresas.

A esto le siguió la introducción de palpadores electrónicos que permiten tomar medidas al "vuelo", es decir sin tener que detener la máquina en el punto medido.

Con esto se empezó a evidenciar la utilidad de un sistema de procesamiento de datos con una unidad de computación, que resolviera problemas geométricos simples, como ser líneas, planos, círculos (líneas definidas por dos puntos, planos y círculos definidos por tres o más puntos, etc.)

Se ha avanzado mucho, desde los primeros conjuntos electrónicos cuya lógica de operación era fija, es decir establecida una vez por todas con la construcción electrónica misma, hasta los potentes y flexibles sistemas actuales, cuya lógica se puede variar según exigencia, gracias a programas software.

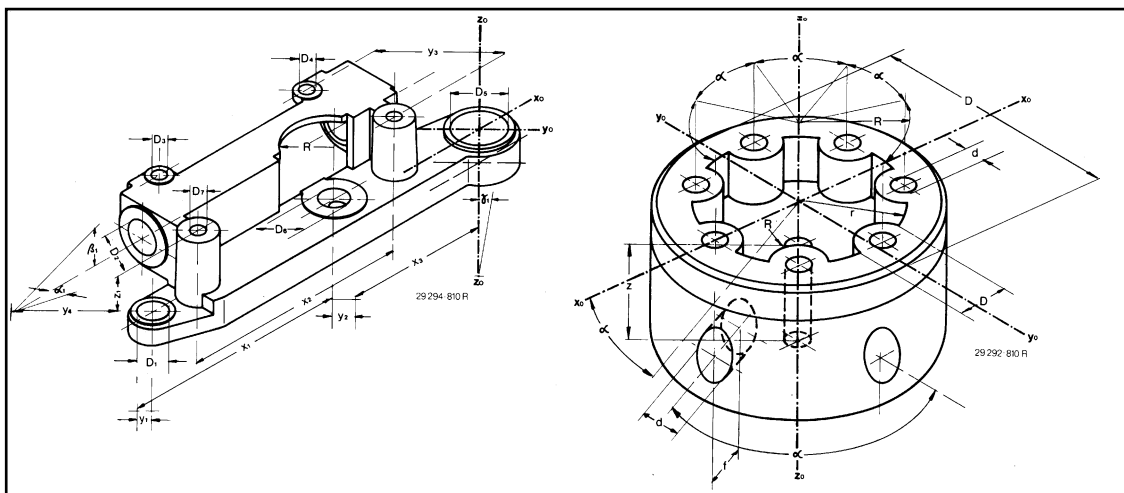


Figura 1

Se ha llegado hoy en día a máquinas motorizadas que inspeccionan piezas complicadas automáticamente, proveyendo un informe escrito formato DIN A4, con cotas teóricas y reales, tolerancias, desviaciones y eventuales fuera de tolerancia.

La Figura 1 muestra como ejemplo, dos piezas de formas complejas, cuyas cotas (longitudes, diámetros, ángulos entre ejes, distancia entre centros de agujeros, etc) deben ser controladas.

Examinemos en detalle ahora las máquinas de medición tal como están conformadas en la actualidad, comenzando desde la estructura mecánica.

### Clasificación

Se pueden clasificar en tres grupos principales:

- a) "Cantilever", o de brazo en voladizo (figura 2).
- b) De puente (figura 3).
- c) De pilares (figura 4).

El primer tipo como podemos observar en la figura 5 implica ciertos inconvenientes que limitan su empleo a las piezas pequeñas, precisamente debidos a limitaciones en su rigidez.

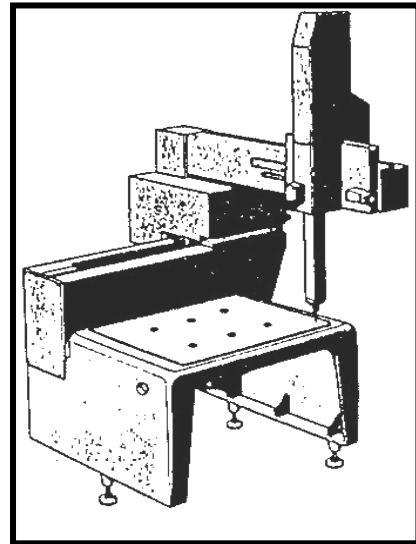


Figura2

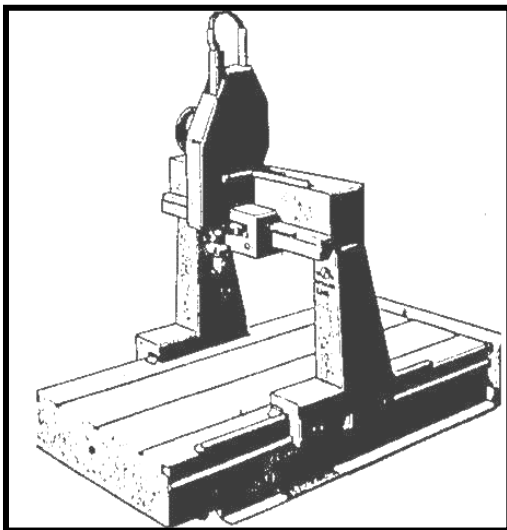


Figura 3

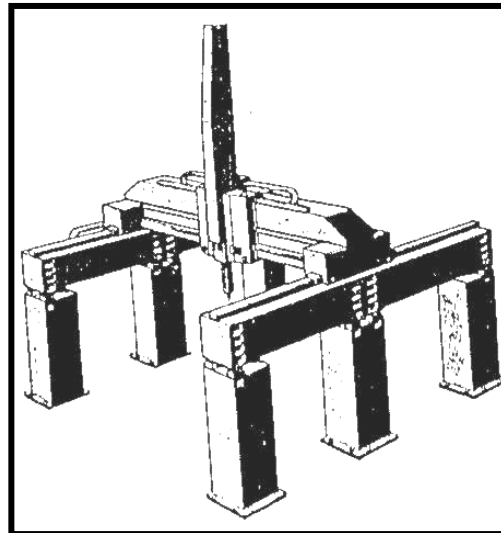


Figura 4

Los otros dos tipos como se ve en las figura 6a y 6b permiten buena accesibilidad a la pieza, son estructuralmente simétricos y permiten usar columnas verticales (es decir el eje Z) con secciones mayores, de lo que deriva una selección más amplia de herramientas aplicables a los cabezales de medición.

El factor que más influye en la selección del tipo puente o de pilares, es la sección transversal. Al crecer ésta, crece la inercia de las partes móviles, reduciéndose la aceleración obtenible en los movimientos del eje longitudinal (X).

Como en la estructura de puente tenemos, además de la viga horizontal, columnas verticales móviles, cuando se sobrepasa un cierto tamaño de sección transversal, es preferible pasar a la estructura de pilares, que permite ahorrar la masa de dichas columnas.

Otro elemento es la mesa de deslizamiento, cuyo costo se hace exorbitante al superar ciertas dimensiones.

Solo para dar una idea de la serie de tamaños que se construyen en la actualidad daremos como ejemplo los construidos por la firma DEA de Turín, Italia, los cuales van desde el modelo Omicron con carreras de 665 x 165 x 350 mm y 1/10 de m<sup>3</sup> de volumen de medición, hasta la Lambda 7913, con carreras de 16000 x 6350 x 4070 y 413m<sup>3</sup> de volumen de medición. Otras configuraciones se muestran en la Figura 7.

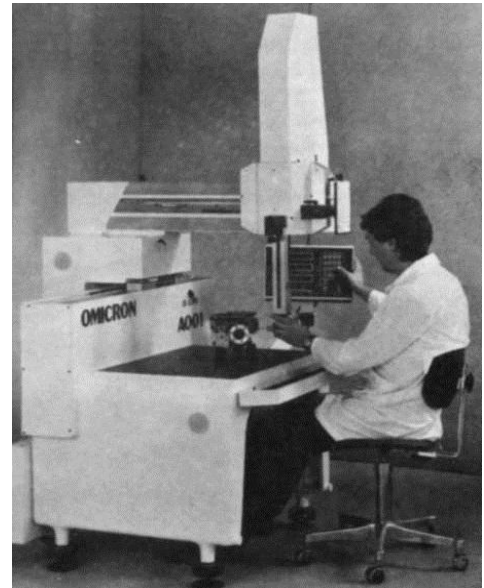


Figura 5

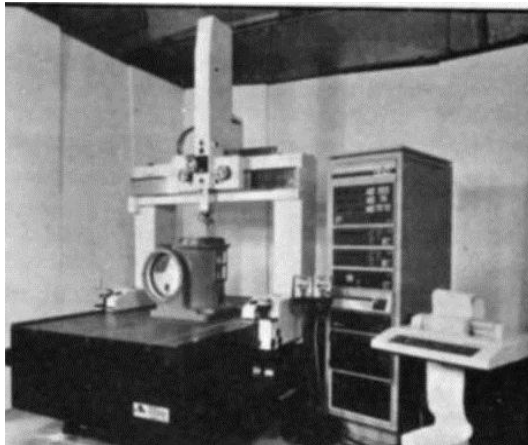


Figura 6a

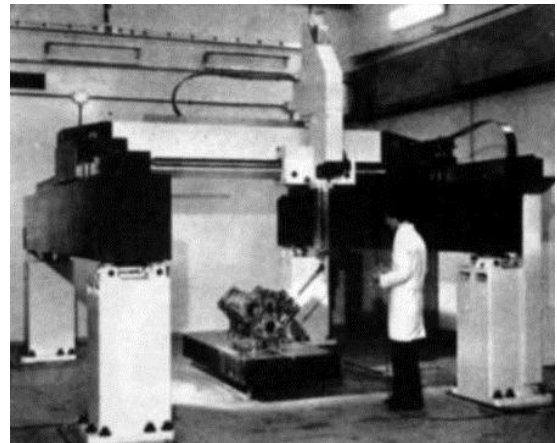


Figura 6b

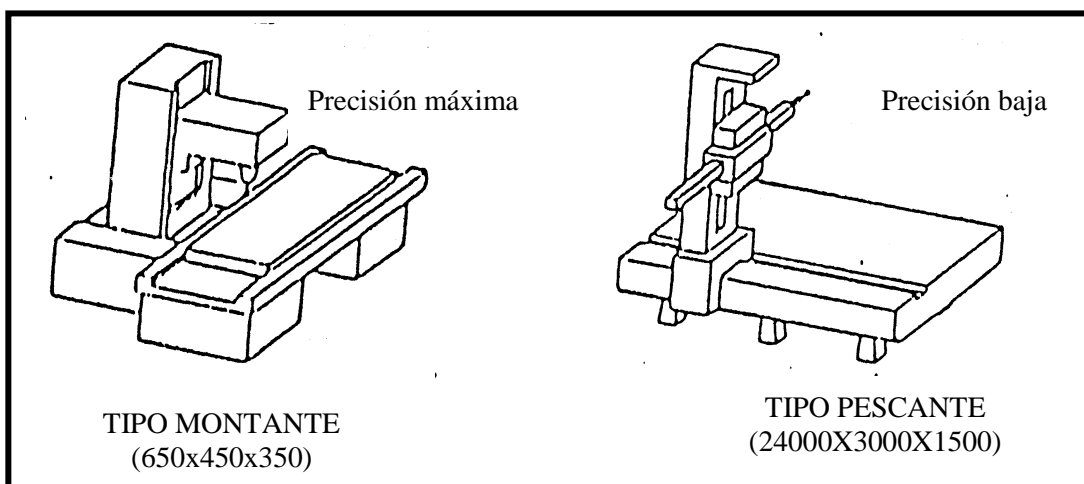


Figura 7

## Palpadores

El segundo aspecto importante a considerar es el palpador. Este elemento del sistema siempre ha sido crítico, porque es el punto de contacto entre la máquina y el elemento a medir.

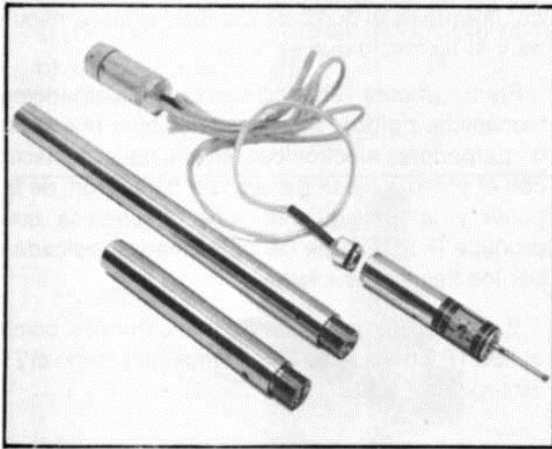


Figura 8

Prácticamente abandonados los palpadores mecánicos rígidos, se utilizan hoy una amplia variedad de palpadores electrónicos, en los que el contacto con el punto a medir genera una deflexión de la punta y la consiguiente señal electrónica que produce la lectura de las coordenadas indicadas por los tres transductores. Existen palpadores punto a punto simples, como el tipo TF6 de la firma DEA, o múltiples como el TF30 (figuras 8 y 9).

Existen también tipos particulares de palpadores para barrido de superficies en continuo.

En este caso la punta del palpador queda siempre en contacto con la superficie a inspeccionar. La punta puede desplazarse según los tres ejes X-Y-Z, con carreras motorizadas de algunos centímetros de longitud.

Naturalmente, existen en cada eje pequeños transductores que permiten informar constantemente, a la unidad de procesamiento de datos, la posición del palpador.

Se puede decir que estos palpadores actúan como una pequeña máquina de medición adicional, cuya inercia es reducida y cuyos movimientos consiguientemente son muy rápidos y pueden seguir súbitas variaciones de forma de la superficie inspeccionada.

Un ejemplo de palpador de este tipo es el TL 3M como se aprecia en la figura 10.

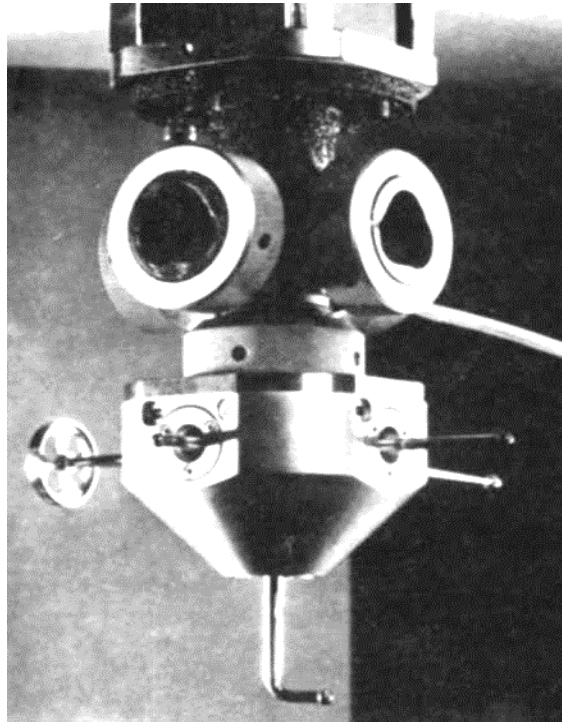


Figura 9

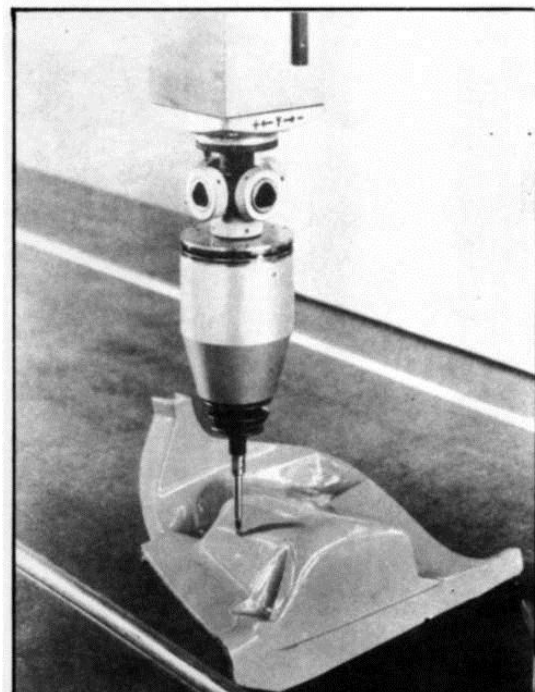


Figura 10

## Conjuntos Electrónicos

En tercer lugar examinaremos los diferentes conjuntos electrónicos que se pueden conectar a una máquina de medición. Ante todo deben distinguirse dos funciones diferentes:

1. Gestión de la máquina de medición, incluyendo la detección de posición, su representación numérica, operaciones del palpador y eventual desplazamiento motorizado.
2. Procesamiento de los datos derivados de la detección de posición.

La primera función puede ser realizada con circuitos a lógica fija (hard-wired) o gestionada por un microprocesador cuya lógica es programable, durante su construcción, pero no modificable después por el operador (firm-wired)

La segunda es hoy normalmente ejecutada por una unidad programable que puede seleccionarse en una amplia gama desde la simple calculadora de mesa hasta la computadora sofisticada con varios terminales para ingreso y salida de datos, y memoria de gran capacidad.

Disponer de una unidad de computación permite resolver problemas de este tipo:

1. Medidas en sistema métrico o pulgadas.
2. Coordenadas cartesianas o polares.
3. Coordenadas absolutas o incrementales.
4. Medición de posición de planos.
5. Diámetros de agujeros y pernos y posición del centro.
6. Compensación automática del desalineamiento de la pieza.
7. Cilindros, esferas y conos.
8. Problemas de relaciones entre elementos geométricos (rectas, planos, círculos), como intersecciones, ángulos, distancias, etc.
9. Medidas de piezas con la ayuda de un programa específico.

Este programa específico contiene, ya sea la información completa sobre la geometría de la pieza (cotas con tolerancias admisibles), o la información complementaria que es necesario dar al control antes de cada medida, como por ejemplo: medida de círculo, número de puntos que se desean tomar para su definición, plano en que se halla, etc.. Como resultado se obtiene un informe escrito que indica las cotas teóricas, las medidas, las tolerancias y el eventual fuera de tolerancias.

Las medidas, con ayuda del programa específico, pueden efectuarse tanto en las máquinas controladas, por el operador, manuales o motorizadas con palancas de comando, como en los sistemas automáticos donde los movimientos de la máquina son gestionados directamente por la computadora (CNC).

Naturalmente en este caso el programa específico contiene también la información sobre el recorrido del cabezal de medida y su velocidad de desplazamiento.

## Preparación del programa

En lo que se refiere a la preparación del programa, en la actualidad se ofrecen al operador dos métodos:

1. Por teclado.
2. Con autoaprendizaje.

En el primer caso se introducen en la memoria de la unidad de cálculo los datos dimensionales de la pieza y los datos accesorios del ciclo de medición directamente del plano de la pieza a medir, siguiendo ciertas instrucciones.

En el segundo caso simplemente se mide la pieza en forma controlada por el operador. Las cotas y las informaciones accesorias, como ser el recorrido descrito por el cabezal, quedan memorizadas en el programa. Al terminar la operación es suficiente sustituir las cotas medidas por las teóricas por intermedio del teclado. Este método es muy simple, utilizándose frecuentemente.

Como ya fuera hecho para la estructura mecánica, es posible efectuar una clasificación de los controles electrónicos desde el punto de vista del usuario.

En el primer peldaño se sitúan los simples dispositivos electrónicos para mostrar el valor de las coordenadas X-Y-Z (Display digital). Estos dispositivos acompañaron la primera difusión de las máquinas de medición y son hoy poco empleados. Había que trabajar con palpadores rígidos y era necesario adicionar o sustraer a cada medida, el radio de la esfera o del cilindro de la punta del palpador.

Hoy en día, con un costo prácticamente equivalente, se realizan pequeñas unidades con microprocesador preprogramado (firm-wired), que permiten la función antedicha más el cálculo del diámetro de agujeros con coordenadas del centro y una compensación, aunque simple, del desalineamiento de la pieza (1<sup>er</sup> tipo).

Además, es posible utilizar un palpador electrónico: las medidas en el "display" digital y la corrección del radio de la esfera es automática.

En un plano superior a estos sistemas se sitúa la familia de controles con calculadoras de mesa (2<sup>do</sup> tipo). En este caso el usuario dispone de una pequeña impresora (generalmente con líneas de 16 caracteres) y de capacidad de programación y memoria suficiente para preparar el programa específico para las varias piezas a medir, como el ya antes mencionado.

### Control con mini computadora

Al final encontramos la muy numerosa familia de controles con minicomputadora (3<sup>er</sup> tipo).

Las principales diferencias respecto a los controles con calculadora de mesa son:

- a) Rapidez de cálculo.
- b) Mayor capacidad de almacenamiento de datos.
- c) Posibilidad de operar un procesamiento de datos de alta complejidad, mediante adecuados programas de software. Por ejemplo tocando 20 puntos en un plano: computación del grado de planidad y contemporánea verificación del ángulo formado por el plano medio con otro tomado como referencia.
- d) Potencia de cálculo suficiente para comandar máquinas motorizadas automáticas.
- e) Posibilidad de enlace con periféricos, como pantallas televisivas, registradores X-Y automáticos, etc.

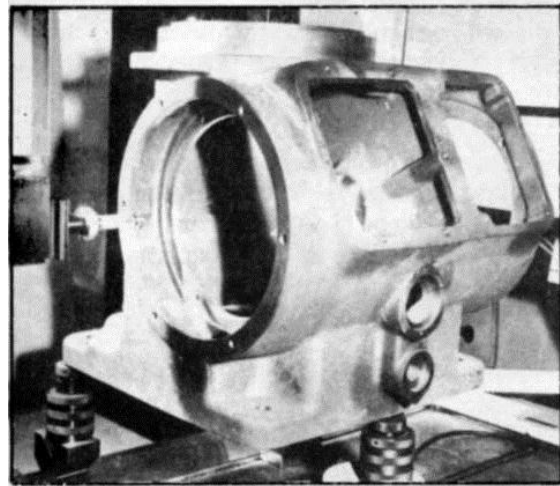


Figura 11

Llegar a orientarse en el campo de las estructuras mecánicas de las máquinas de medición es fácil: los elementos discriminantes son el tamaño de la pieza y la precisión necesaria.

Generalmente queda algo más borrosa la distinción entre los controles electrónicos y por eso es muy útil examinar un ejemplo en detalle.

### Ejemplo

Consideremos la pieza de la figura 11. Es una caja de un compresor de aire. Dimensiones aproximadas 400 x 360 x 340 mm.

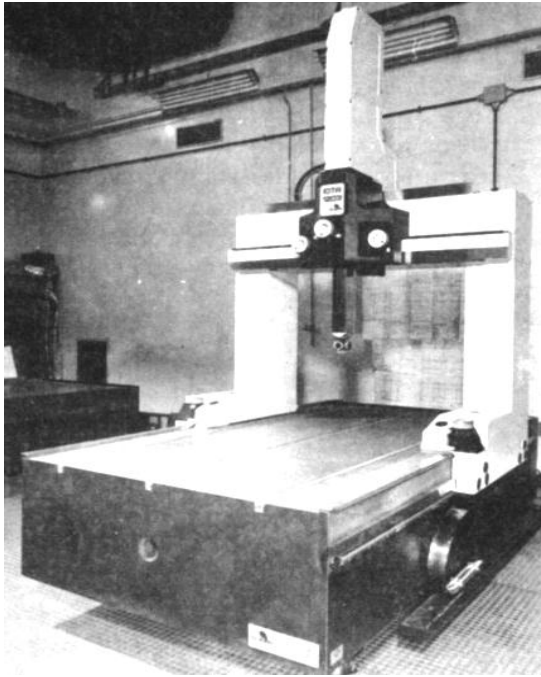


Figura 12

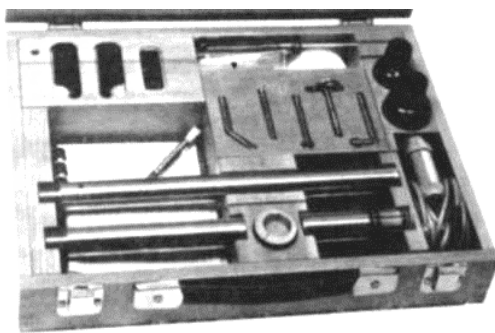


Figura 13

cara cuyo mecanizado sea suficientemente preciso para que se la tome como referencia. A veces la referencia es el eje de un cilindro. En este caso se deberán tomar puntos en la pared del cilindro, el control computa su eje y lo toma como referencia (primer eje de la terna). Para esto se necesita por lo menos un control del segundo tipo.

En algunos casos particulares, puede ser necesario tomar como referencia elementos con acabado superficial malo. Un plano por ejemplo, cuya definición por tres puntos sería insuficiente.

Se toman entonces hasta veinte puntos, se define un plano medio y se toma un eje perpendicular a éste como primera referencia. Para esta operación multipunto, se necesita generalmente un control del tercer tipo.

Imaginemos ahora un corte longitudinal de la pieza. Muchas cotas son verificables con cualquiera de los tres tipos de control: diámetros, distancias lineales; mientras que para controles de planedad el

Tenemos a disposición para el control, una máquina de medir de tamaño y precisión suficiente, un palpador electrónico simple con su correspondiente juego de puntas (figuras 12 y 13) e imaginemos conectar la máquina a controles electrónicos de los diferentes niveles citados.

**¿Es necesario alinear la pieza a los ejes de la máquina?**

Todos los controles descritos antes, permiten evitar esta operación. Naturalmente existen diferencias en el método utilizable.

Con el primer tipo de control se tocan tres puntos de un plano, y por cálculo matemático queda definido un eje perpendicular a este plano.

Tomando dos puntos más en un plano perpendicular al primero, queda definida la terna de ejes ortogonales alineada a la pieza y las medidas serán automáticamente relacionadas a ésta y no a los ejes de la máquina. La Figura 14 muestra el sistema de referencia de la máquina ( $X_M, Y_M, Z_M$ ) y el sistema de referencia de la pieza ( $X_W, Y_W, Z_W$ ).

Lamentablemente, las piezas no siempre tienen una

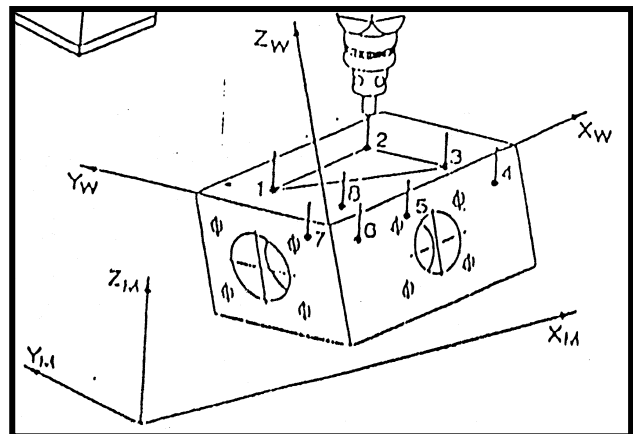


Figura 14

microprocesador generalmente no alcanza. Lo mismo para controles de redondez, perpendicularidad o paralelismo entre planos.

Consideremos las tres alesaduras de la parte central de la pieza de la Figura 11, siendo muy importante la concentricidad de éstas.

Es fácil y posible, con cualquiera de los tres controles, medir secciones de las alesaduras con planos perpendiculares al eje, es decir círculos.

También es posible obtener la posición del centro en coordenadas incrementales (posición de los varios centros respecto al centro de un círculo tomado como dato).

Pero para un real control de rectilineidad del eje, según las normas internacionales ISO o BSI, se necesita un control del tercer tipo, con adecuado programa "software".

El control de rectilineidad prevé que se tomen secciones en la superficie del cilindro (en este caso tenemos partes de cilindros de diferente diámetro).

Mediante cálculo automático se define la posición de un eje que es el mejor posible para los varios puntos tomados y se da el diámetro del "cilindrillo" circunscrito a este eje, y que contiene todos los centros de las varias secciones circulares tomadas.

La diferencia con el otro método es evidente: se puede separar el error de rectilineidad del eje, de su error de posición (figura 15).

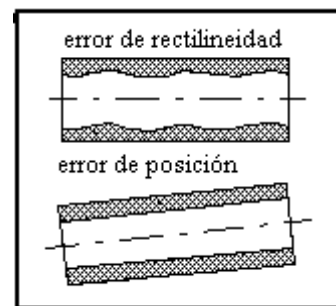


Figura 15

Imaginemos ahora un corte transversal. La pieza tiene dos caras inclinadas y hay que inspeccionar cotas sobre ellas.

Queda muy cómodo establecer un sistema de referencia auxiliar, sin perder el primero.

Con un control del tercer tipo esto es posible, así como se puede verificar la intersección entre el eje definido anteriormente (longitudinal) y los ejes de estas alesaduras oblicuas.

Si los dos ejes no se intersectan, se obtiene la mínima distancia. Obviamente se puede obtener el ángulo que forman.

El ahorro de tiempo respecto a métodos tradicionales en verificaciones de este tipo es realmente enorme. Establecer este sistema de referencia auxiliar, controlar diámetros de alesaduras, rectilineidad de ejes e intersecciones requiere a lo sumo 5 minutos, de ahí su gran versatilidad.

Los tres tipos de control se diferencian también en el formato de la información que suministran.

Muy frecuentemente el control con microprocesador no se enlaza a ninguna unidad impresora. Las cotas aparecen en el display, y al tomar otra medida se borran. La razón es generalmente económica y no técnica. Casi siempre es posible conseguir como opcional una pequeña impresora con líneas de 16 caracteres (figura 16).

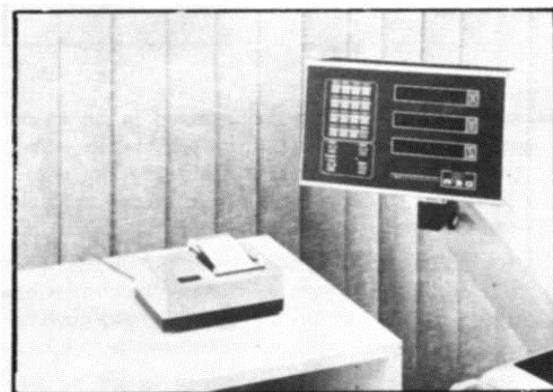


Figura 16



El control con calculadora de mesa, aprovecha la impresora de la calculadora misma, siempre de 16 caracteres por línea. En este caso, el disponer de ella es más importante porque el flujo de información para el operador es ya considerable, especialmente cuando se hacen ciclos de inspección con programas específicos de la pieza, como el antes descrito.

Los controles con microcomputadora son generalmente equipados con impresoras veloces que proveen informes con formato DIN A4. La velocidad es de 30 caracteres por segundo, necesaria para coordinarse con la velocidad de la microcomputadora que elabora los datos.

El formato de impresión permite almacenar en el programa y suministrar al operador, mensajes alfabéticos auxiliares muy útiles.

Siempre con referencia a los controles del tercer tipo, hemos visto que éstos admiten el uso de programas de software complejos. Por ejemplo, programas de estadística, muy interesantes cuando se presentan series de la misma pieza, cuyos datos dimensionales se desee almacenar para verificar, en el tiempo; valores medios, variaciones, porcentajes de rechazos, etc.

Después de esta panorámica sobre los controles electrónicos, aún hay que dar criterios de orientación en la alternativa entre máquina manual, motorizada, o motorizada automática (CNC).

Los aspectos a considerar son dos:

1. Dimensión de la máquina.
2. Ahorro de tiempo en el empleo.

### **Punto 1**

Mientras para máquinas pequeñas/medianas es casi siempre posible escoger entre la versiones manual o motorizada, al exceder el ancho y la altura de la sección transversal del volumen de medida, cierto valor, sólo se producen máquinas motorizadas.

Las razones son las masas móviles y la dificultad para alcanzar los controles manuales situados en tres partes diferentes de la estructura.

El mando puede ser en estos casos por palancas (comando remoto) o sensor (empleo como el de una máquina manual); automático por computadora (inspección de piezas sin intervención del operador). Vale la pena describir rápidamente el mando por sensor. Se emplea este sistema en máquinas de pilares sin mesa. Se aplica a la columna un palpador particular llamado sensor cuya varilla puede ser deflexionada manualmente según los tres ejes X, Y, Z y tiene vuelta a cero con recorte. La deflexión de la varilla provoca el movimiento motorizado de la máquina en la correspondiente dirección.

Es fácil por lo tanto inspeccionar grandes piezas como carrocerías o estructuras soldadas, llevando materialmente la cabeza de la máquina hacia cada punto a medir.

### **Punto 2**

El ahorro de tiempo con respecto a una máquina accionada manualmente puede ser sensible sólo con una máquina automática, porque el accionamiento por palancas (comando remoto) requiriendo la intervención del operador, no tiene ventajas apreciables en este sentido. El accionamiento por palancas, en cambio, permite usar intensivamente el equipo desde cualquier posición, sin cansancio del operador. El mando automático (CNC) se torna particularmente ventajoso en estas dos situaciones: si hay series de piezas iguales, de manera que el tiempo para la preparación del programa específico se subdivide en todos los ejemplares de la serie, o si la pieza es difícil de medir porque hay que llegar con el palpador a lugares poco accesibles a la vista del operador y consiguientemente el tiempo de acercamiento a los varios puntos con mando manual es muy alto. Antes de pasar a una rápida

delineación de los futuros desarrollos en el campo, concluyamos esta parte con la ilustración de algunos ejemplos aplicativos y relativo tiempo de medición.

<b>Pieza</b>	<b>Tipo de máquina</b>	<b>Número de medidas</b>	<b>Tiempo</b>
Caja de cambio de velocidades de camión	Manual con microcomputadores	35	45'
Cuerpo de carburador	Manual con microcomputadora	450	4h 30'
Componente aeronáutico	Motorizada automática con microcomputadora	20	1 h
Caja de motor de motocicleta	Manual con calculadora de mesa	60	45'

### **Desarrollos futuros**

Como desarrollos futuros en el campo de las máquinas de medición tridimensional diremos que los más rápidos se verifican en el campo del procesamiento y transmisión de datos.

En plantas modernas con grandes producciones existe a menudo un centro de control de calidad y confiabilidad, equipado con más de una máquina de medición con su unidad de cálculo, y en otra parte de la planta se encuentra un centro de procesamiento de datos que atiende a diferentes tareas como administración, gestión de almacenes, etc.

La tendencia actual es utilizar la gran capacidad de cálculo de estos centros, también para el control de calidad, conectando las computadoras de las máquinas de medición a la computadora del centro. Esta computadora "madre", puede gestionar la biblioteca de programas específicos de las varias piezas a inspeccionar y en base a los resultados de los ciclos de medida que son transmitidos, puede variarlos.

Veamos concretamente un estudio realizado por la firma DEA para una empresa inglesa. Se ha previsto una unidad de computación central conectada a 8 máquinas automáticas de medición situadas en varias partes de la planta.

En la inspección de la primera pieza de una determinada serie se efectúan todas las medidas previstas por el programa específico que la computadora madre ha seleccionado del archivo y enviado a la máquina correspondiente.

Si todas las medidas resultan en tolerancia, la computadora madre informada, elimina por ejemplo el 20% de las medidas cambiándolas de pieza a pieza en modo aleatorio. Si se sigue sin fuera de tolerancia, se puede eliminar otro 20%. Naturalmente al encontrar una pieza fuera de tolerancia, el sistema vuelve automáticamente a una inspección 100%.

El objeto es un ahorro de tiempo, que en una planta de tal sofisticación, donde las máquinas de medición trabajan tres turnos por día, tiene una inmediata rentabilidad.

En la década de los 90, se alcanzó la integración de la máquina de medición en el proceso productivo, o sea control de la producción. Los avances en ese sentido continúan, habiendo espacio en este campo para desarrollos futuros.

Cuando se fabrican piezas muy complejas, de gran valor por unidad, provenientes de fresadoras o centros de mecanizado con control numérico, es conveniente efectuar controles dimensionales a lo

largo de la fabricación, para evitar el rechazo de una pieza terminada, por un error tal vez ocurrido en las primeras fases del mecanizado.

Por otra parte, cargar y descargar la pieza, tomando cada vez las referencias, significa empleo de tiempo. Este inconveniente puede evitarse de dos maneras:

1. Integrando la máquina de medición directamente en la máquina herramienta.
2. Desplazando la pieza sobre mesas guiadas "pallets", que mantengan las referencias en el movimiento de la una a la otra.

---

## **Bibliografía**

Piovano, Bruguer, Urriza, “Máquinas de medición por coordenadas”, Dto. Técnico ARO S.A.  
Francis T. Farago, “Handbook of Dimensional Measurement”, Industrial Press Inc.  
Eugen Trapet, Franz Wäldele, “Aseguramiento de la calidad para máquinas de medir por coordenadas”, Physikalisch Technische Bundesanstalt