



# Evaluación de la incertidumbre de calibración de máquinas de medir en coordenadas (MMC)

## INTRODUCCIÓN

Dentro de los requerimientos de la industria tenemos en forma habitual solicitudes de calibración de máquinas de medir de tipos diversos. Debido a la característica multifacética de estos instrumentos, que tienen la posibilidad de ejecutar una multiplicidad de tareas de medición diferentes, la evaluación de la incertidumbre de medición, no resulta una tarea sencilla.

Por incertidumbre de medición de un instrumento de medir se entiende, en general, la incertidumbre de los resultados a los cuales se llega con el instrumento bajo condiciones estipuladas y caracteriza un rango dentro del cual se espera tener el valor verdadero de la cantidad medida.

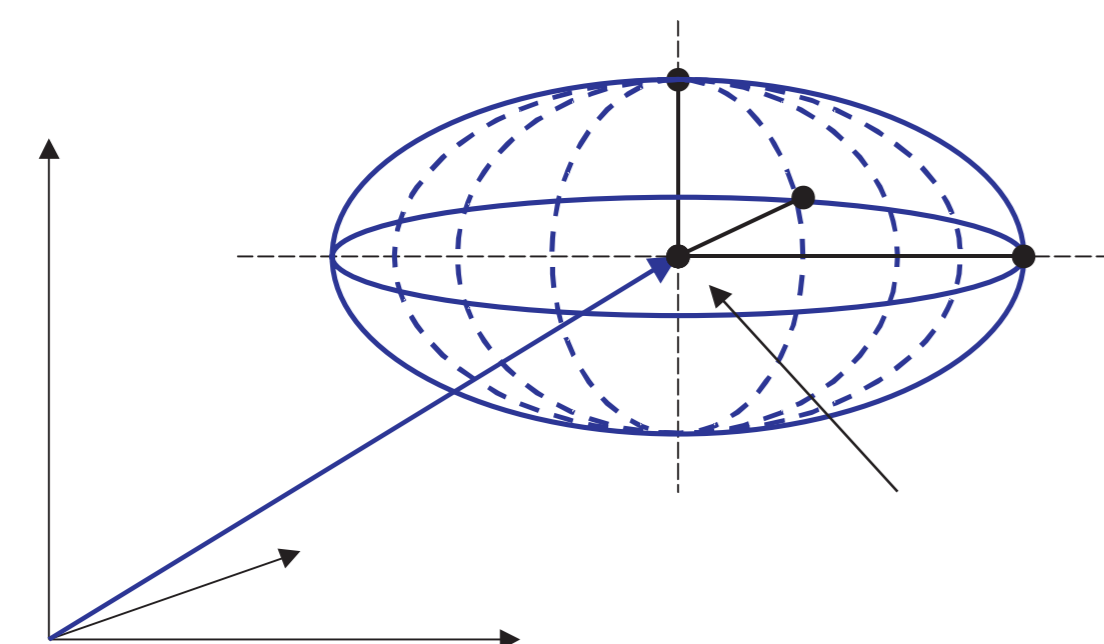
Para determinar la incertidumbre debemos, en primer término, identificar los factores que afectan las mediciones y analizar la importancia relativa de cada uno y el modo en que interactúan, operar luego matemáticamente con esos términos sobre la base de la normativa vigente (ISO-GUM), para arribar finalmente a un valor de incertidumbre expandida representativa del proceso de medición.

El trabajo, que presenta en líneas generales un procedimiento para evaluar la incertidumbre de calibración de MMC, forma parte del proyecto de Asistencia Tecnológica de la autora titulado: Aseguramiento de la Calidad en MMC.

## PLANTEO DEL PROBLEMA

La incertidumbre de medición de una MMC resulta del efecto conjunto de los errores de cada componente individual de la máquina. Estos hacen que, en una determinación de posición espacial, el punto medido ( $P_a$ ) esté rodeado por una zona de incertidumbre tridimensional, determinada por componentes de errores sistemáticos y aleatorios, dentro de la cual está el valor verdadero.

Este paradigma permite suponer que cada punto del volumen de medición puede ser visto con una nube de incertidumbre asociada, cuyo tamaño y forma quedan determinados por las fuentes de error de la MMC, y en general, no resultan esféricas ya que alguna componente de incertidumbre asociada a un eje en particular puede alargar la nube en alguna zona del volumen, siendo un elipsoide la modelización más adecuada.

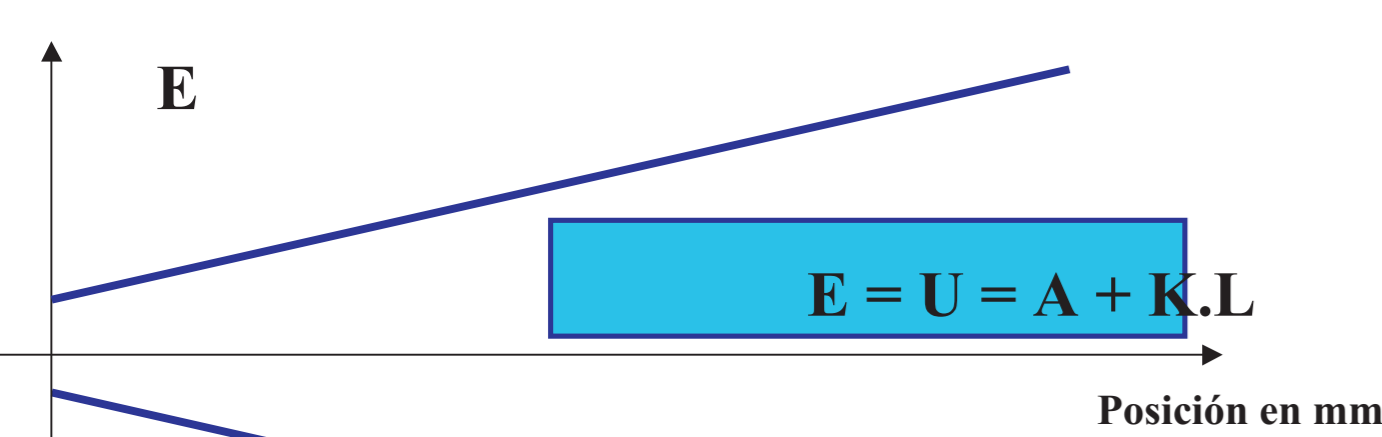


El objetivo del aseguramiento de calidad, reside en la determinación de esta zona de incertidumbre para cada punto del sistema de medición. Dado que los puntos de medición están matemáticamente relacionados, mediante la ley de propagación de errores resultará posible establecer las incertidumbres de los parámetros geométricos de cualquier operación de medición.

## PARÁMETROS DE CALIDAD

### INDICACIÓN DE LA EXACTITUD DE MMC

Como parámetro de calidad para ponderar la exactitud de una MMC se elige la **incertidumbre de medición de la longitud en las tres dimensiones**, que describe la incertidumbre de medición de la MMC para la operación de medición de longitud en el espacio.

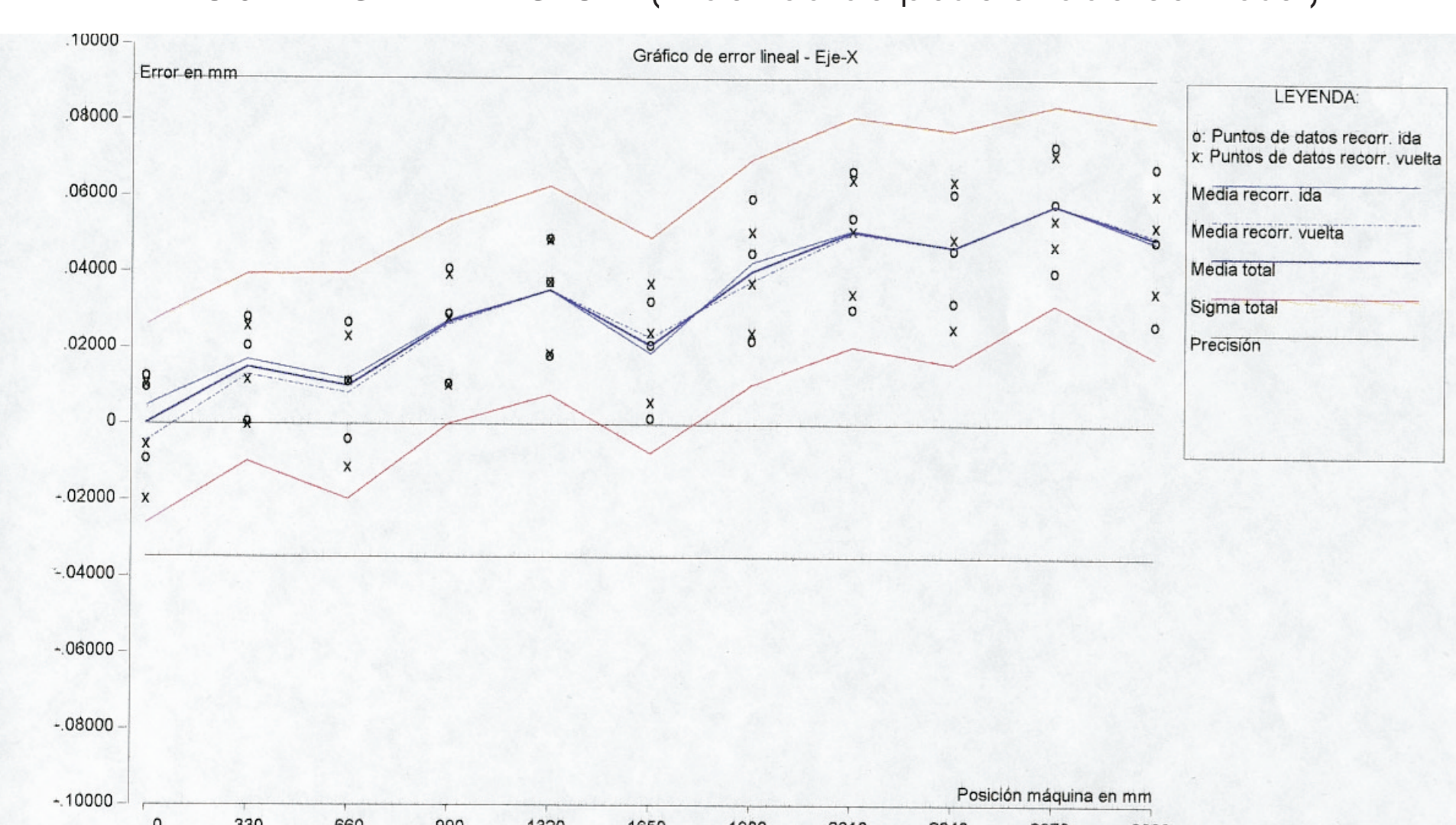


A y K, constantes específicas de la máquina  
L, longitud entre dos puntos cualesquiera

Los motivos para elegir esta definición son:

- Compatibilidad:** la incertidumbre de medición de la longitud en tres dimensiones viene siendo utilizada por diversas Normas.
- Simplicidad:** la medición de una longitud es una operación bastante simple y la incertidumbre de medición de longitud es fácilmente determinable.
- Sencillez:** fácil interpretación de las fórmulas de las desviaciones o errores admitidos respecto del valor verdadero de la longitud en cualquier sentido de medición.
- Generalidad:** es posible deducir las incertidumbres de otras operaciones de medición.

### DATOS DE CALIBRACIÓN (Exactitud de posicionado con laser)



BRAMBILLA, Nancy: cimmm@tm.conae.gov.ar  
DEROSA, Pedro

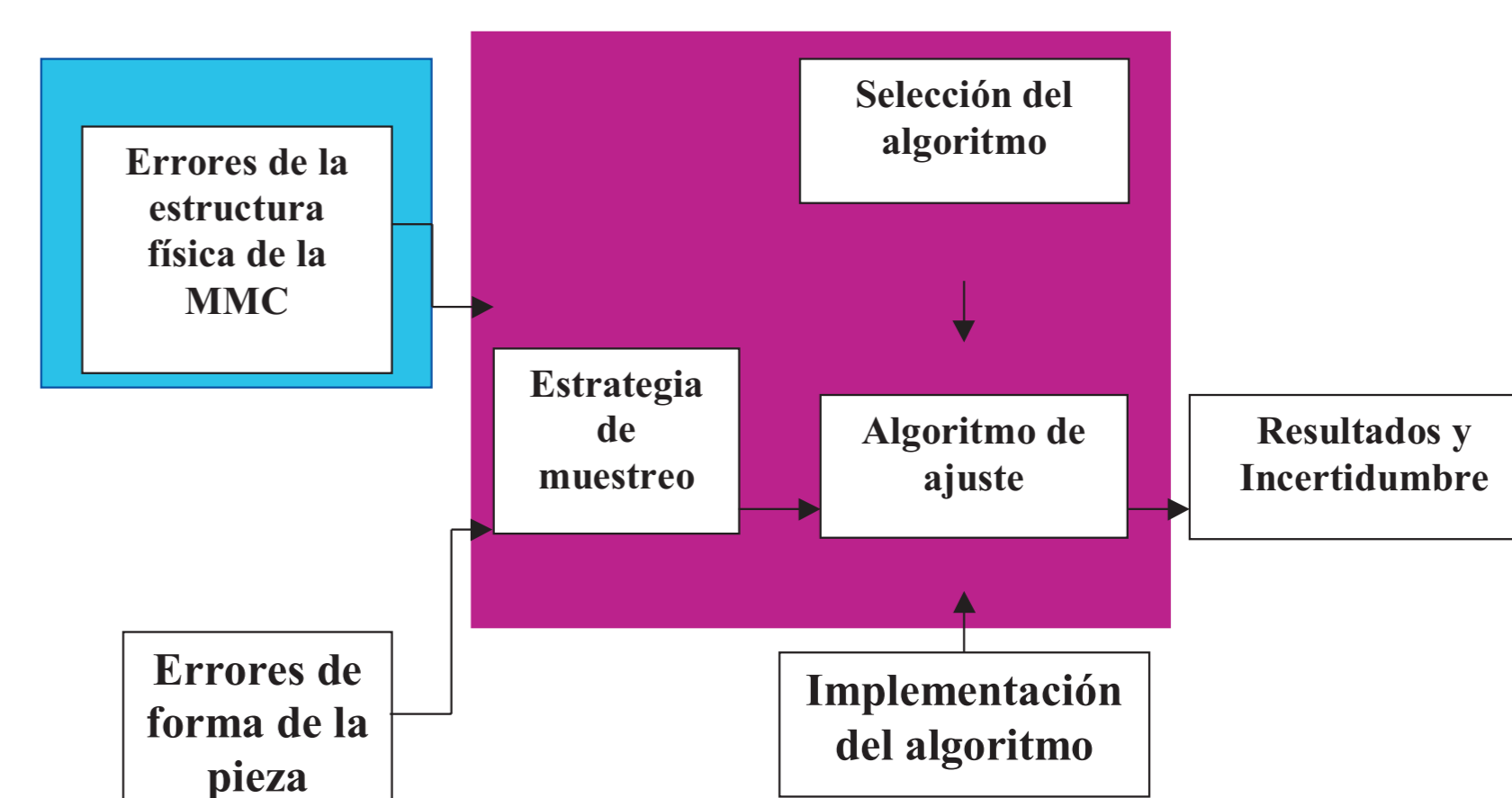


## FACTORES QUE AFECTAN LAS MEDICIONES

Como punto de partida en la evaluación del proceso de medición de una MMC es necesario determinar exactamente qué se va a medir, es decir dar especificaciones sobre la magnitud a medir y sus características.

En general, las máquinas no miden directamente la geometría de las piezas sino puntos individuales en el espacio y luego mediante ajuste matemático se traducen a la magnitud medida. La independencia entre el proceso físico de medir puntos y el proceso matemático de ajustar esos puntos a una geometría ideal es fundamental para entender la medición con MMC, y da una alternativa para evaluar según:

- factores asociados al software de la MMC
- factores asociados a la estructura física de la MMC



## FUENTES DE ERROR

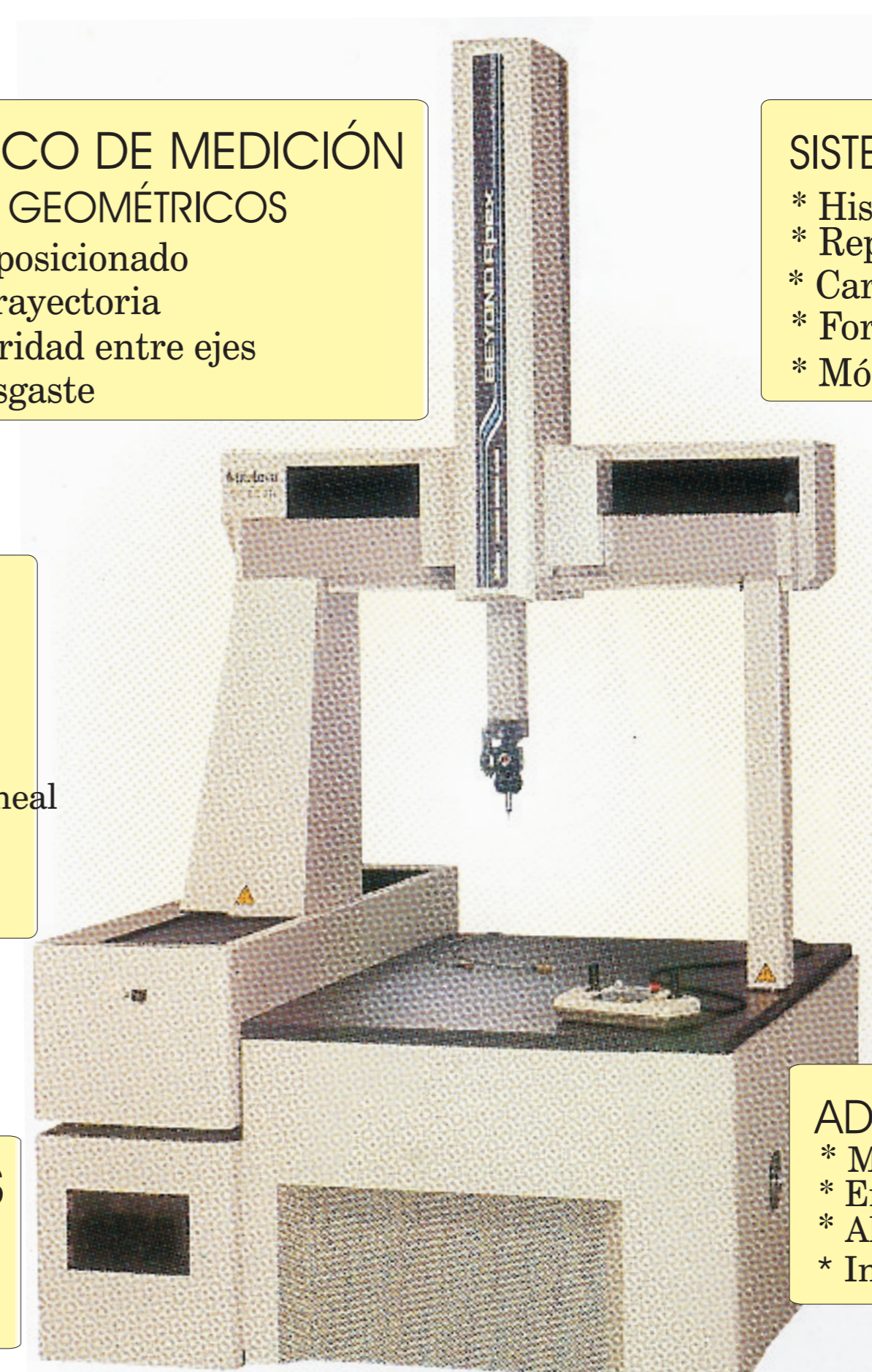
**SISTEMA FÍSICO DE MEDICIÓN**  
ERRORES GEOMÉTRICOS  
\* Exactitud de posicionado  
\* Rectitud de trayectoria  
\* Perpendicularidad entre ejes  
\* Huelgos / Desgaste

**SISTEMA de PALPADO**  
\* Histéresis  
\* Repetibilidad  
\* Características mecánicas  
\* Forma  
\* Módulo de elasticidad

**ELEMENTO A MEDIR**  
\* Acabado superficial  
\* Dureza  
\* Módulo de elasticidad  
\* Defectos de forma  
\* Coeficiente de expansión lineal  
\* Error de contacto  
\* Error de Abbé  
\* Error de coseno

**CONDICIONES AMBIENTALES**  
\* Variación de la temperatura  
\* Gradientes térmicos  
\* Vibraciones

**ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO**  
\* Muestreo  
\* Error de digitalización  
\* Algoritmo  
\* Interpolación



## NORMAS DE CALIBRACIÓN DE MMC.

- American National Standard B89.1.12.M (1990) "Methods for Performance Evaluation of Coordinate Measuring Machines"
- VDI/DE 2617 "Accuracy of Coordinate Measuring Machines, Characteristic and their Checking"
- CMMA "Accuracy Specifications for Coordinate Measuring Machines"
- BS 6808 "Coordinate Measuring Machines"



MEDICIONES REALIZADAS EN CAMPO

## OBJETIVO DE LA CALIBRACIÓN

Lograr una correspondencia uno a uno entre los errores de la máquina y los errores de medición



## PROCEDIMIENTO

- Objetivo:** Calcular la incertidumbre de medición para la evaluación geométrica de máquinas de medir en tres coordenadas.
- Aplicación:** El campo de aplicación se extiende al grupo de todas las máquinas tridimensionales donde sea necesaria la determinación de la incertidumbre de medición para los puntos verificados en la calibración. Los parámetros o magnitudes a ser verificadas son:
  - Exactitud de posicionado
  - Exactitud de medición volumétrica (U1)
  - Exactitud de medición lineal (U3)
  - Repetibilidad
  - Rectitud de trayectoria
  - Perpendicularidad entre ejes
- Fuentes:**
  - Patrón
  - Mesurando ( $u_m$ )
  - Resolución mesurando
  - Resolución patrón
  - Repetibilidad del palpador
  - Errores de alineación
  - Desplazamiento de la temperatura de referencia
  - Gradientes térmico (dT)
  - Coefficiente de dilatación térmica (Da)
- Presentación de los resultados:**
  - Calcular la incertidumbre en el origen (0).
  - Calcular la incertidumbre en el máximo de la escala ( $L_m$ ).
  - Ajustar la recta de incertidumbre de medición del error lineal Según la recta:

$$U_m(G) = \pm (U_m(0) + L/B)$$

$$1/B = \frac{U_m(\text{máx}) - U_m(0)}{L_{m, \text{ca}}}$$

## PLANILLA DE CÁLCULO

EXACTITUD DE POSICIONADO (LASER) / EXACTITUD EN LA MEDICIÓN DE LONGITUD (PATRÓN ESCALONADO)

simbolo	Fuente de Incertidumbre	Valor	Distribución De Probabilidad	Divisor	Coefficiente de sensibilidad ( $c_i = \partial f / \partial x_i$ )	Incertidumbre estándar ( $u_i$ )	Grados de libertad efectivos
$U_p$	Patrón	$U_{ps}$	Normal (k=2)	2	1	Valor* $c_i$ /Divisor	Infinito
$u_x$	Desviación estándar mesurando	$s/\text{raiz}(n)$	Normal (k=1)	1	1	Valor* $c_i$ /Divisor	n-1
$u_{Rp}$	Resolución del patrón	R/2	Rectangular	Raiz(3)	1	Valor* $c_i$ /Divisor	Infinito
$u_{m1}$	Resolución del mesurando	R/2	Rectangular	Raiz(3)	1	Valor* $c_i$ /Divisor	Infinito
$u_{sT}$	Desplazamiento temperatura (T-Tref)	$\Delta T/2$	Rectangular	Raiz(3)	$Lx\alpha_m$	Valor* $c_i$ /Divisor	Infinito
$u_{s\alpha}$	Coefficiente de expansión térmica	$\Delta\alpha/2$	Rectangular	Raiz(3)	$Lx\Delta T$	Valor* $c_i$ /Divisor	Infinito
$u_{grad}$	Gradiente térmico entre pieza y máquina	$\delta t/2$	Rectangular	Raiz(3)	$Lx\alpha_m$	Valor* $c_i$ /Divisor	Infinito
$u_{al1}$	Errores de alineación	$\beta$	Rectangular	Raiz(3)	$Lx(1 - \cos \beta)$	Valor* $c_i$ /Divisor	Infinito
$u_c$	Incertidumbre Combinada					$u_c$	$v_{c,0}$
$U_{95}$	Incertidumbre Expandida	$k * u_c$					$v_{95}$

$$k = t\text{-Student (P=95,45 \%)}$$

$$u_c = [(c_1 \cdot u(x_1))^2 + (c_2 \cdot u(x_2))^2 + \dots + (c_n \cdot u(x_n))^2]^{1/2}$$

$$v_{c,0} = \frac{u_c^2}{\sum u_i^2 / v_i}$$

$$v_{95} \Rightarrow t\text{-Student (P=95,45 \%)}$$

## REFERENCIAS

- Coordinate Measuring Machines and Systems, John A. Bosch, 1995
- Techniques de mesure sur Machines à Mesurer Tridimensionnelles, Metrologie Grand Sud, 1998
- EAL-G17, coordinate Measuring Machine Calibration, 1995.
- The calculation of CMM Measurement Uncertainty via the Method of Simulation by Constraints, Phillips, SD, 1997.
- Guide to the Expression of Uncertainty of Measurement, 1993
- Metrología Mecánica, Expresión de la Incertidumbre de Medición, W. Link, 2000.