

70



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

*DIAGNOSTICO DE MAQUINAS DE TRES EJES, POR
MEDIO DE CONCEPTOS DE GEOMETRIA
COMPUTACIONAL, INSTRUMENTO VIRTUAL, Y
ANALISIS DE MAQUINADOS SIMPLES*

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

P R E S E N T A

GABRIEL SANCHEZ VIZCAINO



DIRECTOR: M. I. JOSE SANCHEZ V.

MEXICO, D. F.

2002

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

PAGINACIÓN

DISCONTINUA

Diagnóstico de Máquinas por Instrumentación Virtual.

A Aquel que dijo: "sin mi nada podéis hacer", por tanto que me a dado, por ser la fuente inspiradora de todos estos años, por permitirme descubrirlo a través de la Ingeniería. Y a Su Madre, por ser el vehículo para lograrlo. Gracias.

A mis padres: Salvador y María, por su enorme sacrificio y por indicarme el Camino, mostrarme la Verdad y darme la Vida.

A mi esposa, Pirru y a mis hijas: Mariana, Isabel y Guadalupe, que sacrificando su tiempo han mantenido vivo el deseo en mi de lograr la meta; para que les sirva de ejemplo en las horas de tribulación.

A mis hermanos: Crisanto, Cecilia, Pedro, Teresa, Salvador, Luz María y Gerardo, que con su ejemplo, amor fraterno y apoyo, lograron que se hicieran realidad estos estudios.

Diagnóstico de Máquinas por Instrumentación Virtual.

A todos aquellos, amigos y compañeros, que siguieron de cerca mi andar, sirva como un agradecimiento a sus consejos, desvelos y oraciones en favor mío, para que sepan que nunca me he olvidado de ellos.

A la UNAM, a la Facultad de Ingeniería, y a mis escuelas Maristas, por la educación y formación que de ellas recibí.

Y en especial a José, porque no solo supo sembrar en mí la inquietud de la ingeniería y guiarme en este camino, sino sobretodo porque fue la mano que sembró en mí (cumpliendo mi vocación) el ideal de un México mejor. Por todo esto: muchas gracias.

**DIAGNÓSTICO DE MÁQUINAS DE TRES EJES, POR
MEDIO DE CONCEPTOS DE GEOMETRÍA
COMPUTACIONAL, INSTRUMENTO VIRTUAL,
Y ANÁLISIS DE MAQUINADOS SIMPLES**

INDICE

CAPÍTULO	TEMA	PÁGINA
I	Arribo del concepto de instrumentación virtual en ingeniería mecánica.	1
	Objetivos de esta investigación.	5
	Plan de presentación de esta tesis.	5
II	Antecedentes históricos y análisis de instrumentos mecánicos de precisión.	7
	Fundamentos mecánicos instrumentación moderna de exactitud.	13
	Configuraciones de máquinas, sensores y actuadores.	17
	Fenómenos estáticos, dinámicos y cadenas de control.	22
III	Conceptos básicos de error, exactitud e incertidumbre en instrumentos multieje.	29
	Análisis de propagación de errores.	32
	Errores dinámicos.	36
	Evaluación y crítica de modelos.	41
IV	Alternativas de modelado.	45
	Espacios a modelar.	46

	Modelación lineal.	46
	Modelación no lineal.	50
	Modelación con elementos de geometría computacional.	51
	Concepto de instrumento virtual.	56
	Conclusiones de modelado.	56
V	Empleo de la instrumentación virtual al estudio de casos probables y casos concretos.	58
	Hipótesis básicas.	58
	Empleo de correlaciones lineales.	60
	Empleo de correlaciones no lineales.	68
	Análisis no lineal a casos con independencia cinemática.	69
	Análisis no lineal a casos con dependencia cinemática.	74
	Análisis de casos 2½D y 3D.	82
	Fenómenos de Histéresis.	85
	Integración de recursos al estudio de caso: fresadora 3D y placa de vidrio.	89
VI	Resultados. Conclusiones. Reconocimientos.	97
APENDICE A	Glosario de términos.	100
APENDICE B	Discusión de los principales procesos normalizados de verificación y diagnóstico de máquinas multieje.	107
BIBLIOGRAFIA		115

CAPITULO I

ARRIBO DEL CONCEPTO DE MECANISMOS VIRTUALES EN INGENIERIA MECANICA.

OBJETIVOS DE ESTA INVESTIGACIÓN.

PLAN DE PRESENTACIÓN DE ESTA TESIS.

1. ARRIBO DEL CONCEPTO DE MECANISMOS VIRTUALES EN INGENIERIA MECANICA.

1.1 INTRODUCCIÓN.

Las tecnologías del Control de la Calidad de tamaño y forma de objetos mecánicos, esta sustentada fuertemente en la alta exactitud de las máquinas que los forman, en los procesos de fabricación, y en los instrumentos y principios de diagnóstico de ambos: máquinas y objetos maquinados. Con estos recursos es posible efectuar las correcciones en los procesos de manufactura o en el mantenimiento de máquinas.

La mejora de exactitud de dichos mecanismos u objetos ha permitido desarrollar a su tiempo máquinas de relojería e instrumentación mecánica fina, armamento a alta velocidad, microscopia óptica, electrónica y de fuerza atómica, instrumentos inerciales de aviación y astronáutica, telescopios espaciales, discos magnéticos y ópticos compactos para computadoras, y sus sistemas de posicionamiento, lectura y escritura, circuitos integrados de alta densidad, instrumentos de manipulación dentro de células vivas, entre otros productos.

Al mismo tiempo que evoluciona la tecnología mecánica hacia la alta exactitud, surgen nuevas necesidades en su aplicación a nivel masivo, de comercio entre diversos actores de las cadenas productivas o de consumo, de adopción de normas, y de elección y formación de árbitros para calificar la calidad de los productos. Los campos en que la exactitud se convierte en el objeto de trabajo, abarcan a los laboratorios de investigación o de desarrollo de altas tecnologías, a los centros de control de calidad industriales, a los productores de máquinas e instrumentos, a los laboratorios de servicios de medición y calibración, a los sistemas de normalización gubernamentales y privados, a los organismos internacionales encargados de establecer la universalidad de medidas y las especificaciones de intercambiabilidad de partes.

El caso que nos ocupa (máquina de tres ejes), esta se ha elegido como un instrumento genérico, que bajo diversas modalidades o modificaciones se emplea en diversos campos, desde la industria metal-mecánica hasta el campo clínico (aparatos de estereotaxia). Este

instrumento sería una fresadora si se emplea para fabricar; una máquina de medir por coordenadas (MMC) si se usa para medir o un robot si se usa para posicionar objetos en 3D. El instrumento se ha elegido también para incursionar en el análisis y las posibilidades de mejora de instrumentos actuales, en que ya se han integrado lectores ópticos o magnéticos, servomotores para control numérico, y dispositivos de cómputo para su administración en alto nivel. El objeto de esta investigación es también de interés docente, pues la formación de nuestros ingenieros a nivel nacional es muy escasa en los conceptos de ingeniería de precisión, geometría computacional, y tecnologías complementarias de medición, diagnóstico y control.

Aunque en este contexto es indistinta la aplicación que se le da a los instrumentos múltiple, se elegiran como instrumentos tipo a) la fresadora de tres ejes y a la máquina de medir por coordenadas (MMC), por ser los más versátiles y comprometidos con la exactitud, y porque tienen equivalencias muy cercanas en sus tareas de fabricación y de medición.

El objeto central de esta tesis sin embargo, no es la propuesta de una técnica especial de diagnóstico para una máquina en particular, sino la adopción de modelos que la representen, de procesos simulados de fabricación o calibración que aportan información de su comportamiento, de técnicas numéricas que resuelven los modelos, de interfaces que permiten simular bidireccionalmente los procesos de fabricación o diagnóstico, y finalmente los beneficios que en los terrenos industrial y legal puede aportar dicho instrumento.

1.2 ARRIBO DEL CONCEPTO DE MECANISMO VIRTUALE EN INGENIERIA MECANICA.

1.2.1 Arribo en el campo de la tecnología de las mediciones de alta exactitud.

En el contexto de mediciones y estándares, el concepto de patrón virtual tiene una historia que se remonta al nacimiento mismo del patrón de longitud "metro", que sustituye el valor de referencia (pie) de esta magnitud basada en las dimensiones humanas, por el valor "fijo" de otros valores de referencia como el perímetro de la tierra.

La inestabilidad del patrón físico por envejecimiento de materiales o por variaciones de temperatura, llevo a la predicción de su comportamiento por modelos. En la búsqueda de su exactitud se redefino por longitud de onda de la radiación de gases excitados, y se volvió a redefinir por recorrido de la luz en un intervalo de tiempo (1985). El concepto "metro" evoluciono de patrones materiales, a fenomenos físicos y modelos que los describen. Se puede decir entonces que el "metro primario" actual es un "instrumento virtual" que no existe físicamente, pero que se le reproduce a través de experimentos y correlaciones entre mediciones ópticas y de tiempo, que se enuncian en su definición.

En metrología geométrica tridimensional, el concepto es relativamente nuevo, y nacio del análisis del comportamiento de instrumentos. Particularizando el análisis a la MMC, este instrumento posee tres escalas y cuatro cuerpos que se mueven formando cadenas

cinemáticas de uno, dos o tres pasos, cinemáticamente dependientes, donde las imperfecciones de cuerpos y escalas se combinan produciendo 21 (veintiuno) errores fuente considerados independientes; sin contar aquellos que se originan en los ensambles, ni los que se originan por efectos dinámicos. Dichas fuentes de error sin embargo, se combinarán para producir errores en sólo tres dimensiones. El comportamiento de estos instrumentos, u otros más simples (máquinas de longitud, mesas x, y, proyectores de perfiles), no ha sido plenamente comprendido por los usuarios de dichos instrumentos, por organismos certificadores privados, ni aún por importantes laboratorios de referencia de países latinoamericanos, asiáticos y africanos.

Los temas de universalidad de medidas, trazabilidad y normalización en metrología 3D, están animados de controversia, a grado tal que no ha sido posible unificar criterios normativos por organismos certificadores en el interior de la comunidad europea, ni entre esta comunidad y los laboratorios primarios de Asia y América. Algunos organismos como **DKD y PTB en Alemania, Gustavo Colonnetti en Italia, Universidad de Eindhoven en Holanda entre otros, han introducido ya sus conceptos de "instrumentación virtual"** para deshacer tal controversia, y promueven su adopción. Consisten tales "instrumentos virtuales, en algunos de los siguientes recursos: modelos matemáticos descriptivos de errores fuente, de su propagación, modelos representativos de los sólidos constituyentes del instrumento, modelos representativos del comportamiento dinámico del instrumento y de objetos a medir, rutinas representativas de procesos de medición, sistemas expertos de medición o diagnóstico de partes, etc. En la búsqueda de exactitud, otros grupos de esos y otros organismos se han dedicado al perfeccionamiento de modelos que incluyen lazos de control, redes neuronales y recursos de visión, con una tendencia unificadora de recursos, cuyo resultado es un ambiente computacional gráfico interactivo. Existe además la tendencia de fabricantes de instrumentos a integrar ayudas gráficas para asistir a los usuarios en las tareas de medición aunque desligadas de la exactitud, llamadas también recursos virtuales.

1.2.2 Arribo en el campo de los Procesos de Manufactura.

En el campo de los procesos de fabricación, los conceptos cercanos a "mecanismos virtuales" aparecen con la aparición misma de los conceptos CAM (Computer Aided Manufacturing), que trasladan el diseño de piezas definido por polinomios de superficies, por primitivas computacionales, o por bases de datos, a las máquinas de control numérico estableciendo rutinas de movimientos calculados.

Dentro de esta categoría de recursos virtuales, merece la pena mencionar los siguientes antecedentes:

Archivos DXF, de texto ASCII y sintaxis pública, que es adoptado como vehículo de intercambio de información de primitivas geométricas,

Código G, que es código público de texto ASCII, que controla movimientos de máquinas herramienta, ambos (DXF y G) pueden ligarse por pre y postprocesadores.

Código IGES, como un estándar altamente empleado en procesos industriales.

Estándar **CATIA** (privado de Ford), adoptados por la industria automotriz para soportar diseño, análisis y procesos de manufactura, y que está ganando mercado al ser elegido por las grandes empresas como infraestructura estándar.

La propuesta de estándar **ISO 1003 o STEP**, que está en formación y pretende integrar en un solo estándar los aspectos de diseño, fabricación, análisis, diagnóstico y control de calidad de objetos mecánicos

El concepto de mecanismo virtual obtuvo un avance importante con la aparición de sistemas expertos CAM en que éstos revisan las velocidades óptimas de corte, previenen de impactos, y tienen mapas de las máquinas- herramienta y sus accesorios, de tal manera que es posible programar accesos de manipuladores y objetos por maquinari, definir sujeciones, efectuar cortes y operaciones booleanas, cambiar herramientas y retirar piezas. **En este campo de fabricación, sin embargo, los conceptos de error son escasamente manejados**, de tal manera que las idealizaciones de máquinas pasan por alto errores en piezas que demandan alta exactitud, como es el caso de levas, impulsores de gases en bombas de desplazamiento positivo, o calibres de forma. La bondad teórica del control numérico, de producir desplazamientos de hasta 10^6 del desplazamiento máximo, es confundida con su exactitud, y las posibilidades de su explotación son desperdiciadas por la ignorancia del comportamiento real de las máquinas

Por otra parte, las posibilidades de adquisición de codificadores de posición, de servomotores, de interfaces y controladores, está ya al alcance de la mano para investigadores y desarrolladores independientes a relativamente bajo precio, que permiten convertir viejas máquinas herramienta en excelentes instrumentos CNC. Considerando esta situación de la tecnología actual, las especificaciones de alta exactitud en procesos de maquinado se vuelven alcanzables y atractivas, si el comportamiento de sus errores se puede incluir en modelos de predicción y programar su compensación

1.2.3 Arribo en el contexto de la Ingeniería de Precisión

En este contexto ambos campos están unificados, y tienen por objeto el diseño de nuevas máquinas herramienta, nuevos procesos de fabricación, nuevos procesos de medición o refinamientos de los ya existentes, nuevos procesos de diagnóstico de instrumentos

Para propósitos de este proyecto, puede definirse el concepto de **MECANISMO VIRTUAL** como "el conjunto de modelos matemáticos y en su caso métodos de solución, bases de datos, interfaces, primitivas CAD, ambientes de animación, que representan el comportamiento de mecanismos multicoordenada potencialmente reales, con alguno de los propósitos siguientes:

Facilitar el entendimiento de fenómenos de error 3D, en el seno del volumen de fabricación o medición, ya sea como producto de errores más elementales, ya sea como una práctica defectuosa de fabricación o medición.

Que permitan corregir procesos a fin de mejorar exactitudes.

Que permitan diagnosticar errores fuente de máquinas o sus equivalentes, y en su caso corregirlos.

Que faciliten el diseño y enseñanza de protocolos de fabricación, medición o diagnóstico.

1.3 OBJETIVOS DE ESTA INVESTIGACIÓN

Atendiendo a la oportunidad y necesidad de atender las necesidades docentes, tecnológicas e industriales de la ingeniería de precisión en nuestro país, y al desarrollo del estado del arte en instrumentación multieje física y virtual, se eligen como objetivos de esta línea de investigación:

Dar a conocer la importancia histórica, teórica, industrial, científica y en su caso legal, de la instrumentación física y virtual multieje, principalmente la tridimensional ortogonal

Dar a conocer los aspectos principales de diseño y de operación de instrumentos multieje que influyen en su exactitud, y sus tendencias tecnológicas

Hacer un análisis de la manera como afectan las variables de exactitud de instrumentos en diversos campos y aplicaciones, resaltando principalmente la utilidad y necesidad de desarrollar el recurso de la instrumentación virtual.

Revisar y analizar los mecanismos virtuales principales, y elegir uno propio que permita determinar los errores principales de una máquina de tres ejes, por medio de maquinados simples reales o simulados

Emplear los recursos virtuales elegidos para establecer correlaciones entre errores fuente y resultados, con datos de casos reales y con datos de casos simulados, obtenidos estos últimos de recursos virtuales no idénticos a los empleados para diagnosticar

Establecer conclusiones

1.4 PLAN DE PRESENTACIÓN DE ESTA TESIS.

El capítulo I que concluye, pretendo contextualizar esta investigación, haciendo énfasis en la importancia que tiene en los contextos de ingeniería de precisión, en las tendencias tecnológicas actuales, en la conveniencia nacional de estimular y alentar líneas de investigación que tiendan a asimilar estas tecnologías, pero también en la oportunidad de desarrollar recursos humanos en el campo, para concurrir oportunamente a los foros legales y de comercio, donde la precisión posee valor agregado o puede ser tema de controversia

En el capítulo II se hará una introducción a los conceptos y tecnologías tradicionales de ingeniería de precisión, y a los secretos y recursos actuales de que ella depende.

En el capítulo III se hará un análisis de errores en instrumentos multieje, criticando los principales modelos considerados estandar, a fin de justificar el modelo y metodología propias de análisis de máquinas multieje, que darán lugar al capítulo IV.

El capítulo IV se dedicará a la presentación y discusión de los modelos de la geometría computacional, como candidatos idóneos para representar, diagnosticar y operar instrumentos, con clara equivalencia con instrumentos reales, y con ventajas superiores a los modelos tradicionales

El capítulo V se dedicará al empleo de recursos de modelación lineal como precedente y simplificación útil de procesos de calibración sobre casos concretos; a la correlación por modelos de geometría computacional, a las posibilidades de diagnóstico fino por el manejo no lineal de modelos; y finalmente por la inclusión de fenómenos de histéresis. Se considera que la mayoría de casos de máquinas deformes queda cubierta con este análisis o con ligeras modificaciones o ajustes de ellos

El capítulo VI se dedica a resumir resultados que ya quedaron comentados durante el desarrollo de temas, al establecimiento de conclusiones, y al reconocimiento de instituciones y profesionales que antecedieron y soportaron este trabajo

El Apéndice A Glosario de términos, se introduce a fin de no tener que definir dentro de temáticas especiales los términos necesarios de ingeniería de precisión, pero que muchas veces son ignorados o tomados de manera diferente por especialistas de la misma área

El apéndice B Discusión de procesos normalizados de calibración y verificación, se introduce con el fin de ilustrar sobre antecedentes cercanos de esta tesis en el contexto normativo, y a fin de comparar y justificar las aportaciones propias

El resumen **Bibliográfico**, incluye los textos principales que se consideran obligados en este tema, así como los artículos que se han vuelto famosos por sus contribuciones, o porque revelan el estado del arte en investigaciones avanzadas de ingeniería de precisión.

CAPITULO II

ANTECEDENTES HISTORICOS Y ANÁLISIS DE INSTRUMENTOS MECÁNICOS DE PRECISIÓN.

FUNDAMENTOS MECÁNICOS DE INSTRUMENTACIÓN MODERNA DE ALTA EXACTITUD.

CONFIGURACIONES DE MÁQUINAS, SENSORES, ACTUADORES, FENÓMENOS ESTÁTICOS Y DINAMICOS, LAZOS DE CONTROL EN INSTRUMENTOS MECÁNICOS DE PRECISIÓN.

2.1 ANTECEDENTES HISTORICOS Y ANÁLISIS DE INSTRUMENTOS MECÁNICOS DE PRECISIÓN.

Como se comento en el capitulo previo, el desarrollo de la instrumentación mecánica está muy escasamente documentado por la literatura técnica, y peor aún desde el enfoque de ingeniería de precisión. Se considera que en la generación actual de instrumentos mecánicos, los objetivos de exactitud no son alcanzables con sólo tecnología mecánica, sino que requiere de otras disciplinas, y aún los conocimientos de aquella son difícilmente aplicables para los profesionales que no han tenido la necesidad cercana de diseñar o construir dispositivos mecánicos exactos. El contenido de este capitulo se ha orientado a documentar aspectos importantes del desarrollo de la exactitud con un enfoque docente, y a contextualarlo el trabajo de tesis en el campo tecnologico.

2.1.1 Edad antigua.

Es de suponer que los estándares de medida, principalmente de longitud y masa, hayan arribado a la historia con la aparición misma de las civilizaciones, pues las necesidades de trueque o comercio en sus formas más elementales lo requirieron, así como el acoplamiento de los objetos e instrumentos más elementales a las proporciones humanas. Entre las reliquias más antiguas rescatadas se encuentran un conjunto de masas y escala que Perry [1], considera pertenecieron a civilizaciones prehistóricas hindues (mas de 9000 años), que no se han podido fechar exactamente. Ver figura 2.1. Perry estima que los antiguos sistemas de medidas egipcios están basados en los hindues, de los que ya se cuentan masas y balanzas a 7000 años antes de Cristo. Ver figura 2.2

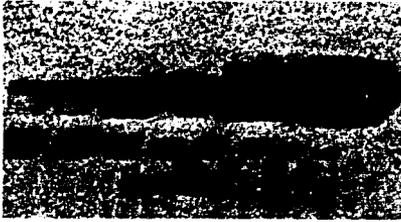


Figura 2.1 Pesas de piedra hindúes, se les atribuyen 9000 años

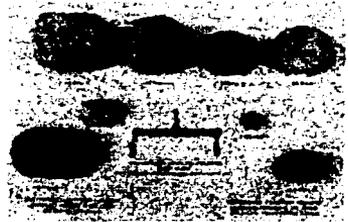


Figura 2.2 Pesas egipcias y balanza. Se les atribuyen 7000 años

Es de suponer que la construcción de las Pirámides de Gizeh, demandó de instrumentos de medida diferentes al de longitud, y del empleo de recursos adicionales para obtener escuadría, orientación, y relaciones especiales en sus construcciones ($\pi = 3.14159262\dots$, se encuentra en varias relaciones), pero dentro de las reliquias egipcias de esta época resalta el *cuibito* dividido en 24 "digitos", cuya medida es aproximadamente de 187 mm. Ver espécimen de la figura 2.3 y detalle figura 2.4 [1]

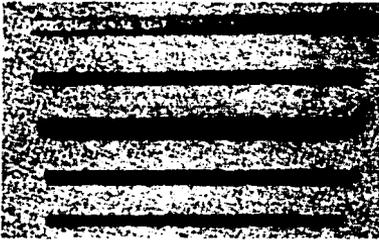


Figura 2.3 Cinco cúbitos egipcios hechos de diferente material



Figura 2.4. Detalle del cúbito inferior de la figura

Un instrumento de medida muy singular lo constituyen los *sistemas de numeración* y los recursos materiales para su representación, pues es lógico que estos preexistieron, ya que las unidades de medida y sus divisiones o múltiplos los requirieron, así como tablas para establecer sus equivalencias o conversiones en aritméticas primitivas. Ver figuras 2.5 [2] y 2.6.

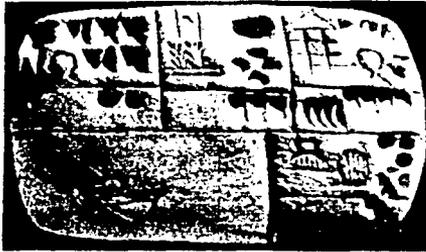


Figura 2.5 Tablilla de contabilidad de raciones Uruk 3000 a C. Museo del Louvre



Figura 2.6 Tabla romana de conversión de pesas y medidas de varias civilizaciones

2.1.2 Edad Media y Renacimiento

En el contexto de este resumen, referirse a la Edad Media no es desconocer el progreso que las tecnologías y ciencias mecánicas tuvieron fuera de Europa, sino que se considera que en el resto del mundo la evolución fue similar o menor. Efectivamente, después de la caída del Imperio Romano, mucho del patrimonio científico y cultural de la humanidad fue perdido, rescatado en parte, y re-descubierto por la sociedad teocéntrica europea, es en este periodo que las matemáticas son tomadas inicialmente en sentido mágico, posteriormente dan un impulso a la astronomía como ciencia ligada a Dios, para luego dar lugar a otras aplicaciones como la arquitectura e ingeniería medievales, finalmente toman su valor científico en las primeras universidades [3].

Fue en el Renacimiento en los 1500's, cuando la cultura homocéntrica retoma las proporciones humanas convirtiéndolas en la referencia de medida, y como base de numeración. Ver figura 2.7.

Así las relaciones 1/5, 1/10 (números de dedos de mano y de dos manos) son tomadas como ideales, después se asocio al 6, y al 16 los mismos atributos de perfección, así cubito tiene 6 palmas, el pie es la sexta parte de la altura del hombre, y un pie tiene 16 dedos de longitud. Similares relaciones encontramos en las medidas Nahuatl con el *Cemall* o distancia del hombro al dedo índice.

Aparte de la importancia científica, artística y filosófica del renacimiento, en este periodo se generan ideas tecnológicas que guiarán los siguientes pasos de las ciencias de la medida.



Figura 2.7. Canon de las proporciones humanas. Da Vinci, 1500

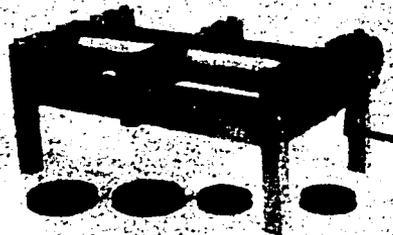


Figura 2.8. Torno de roscas de pasos variables por combinaciones de ruedas dentadas. Construido con bosquejo de Da Vinci.

En la figura 2.8 podemos observar un "torno" generador de tornillos de diferentes pasos, por la combinación de ruedas dentadas, reconstruido a partir de bosquejos dibujados por Leonardo Da Vinci (1500).

Desde el punto de vista de sus contribuciones a las tecnologías de precisión, el torno de roscas de Da Vinci trasciende porque a) emplea la conversión de movimientos angular-lineal para obtener sub-incrementos de longitud de manera casi-continua, usando el principio de subdivisión del círculo, b) Los principios de *periodicidad* de tornillo y ruedas dentadas pueden ser explotados a fin de incrementar exactitud en subsiguientes generaciones de tornillos. A partir de este momento, el tornillo, el círculo y sus subdivisiones, se convirtieron en los recursos de la exactitud geométrica por excelencia.

Los principios a) y b) mencionados, se formalizarían más tarde bajo el concepto de "*métodos de medición combinatorios en series cerradas*", que permitirían obtener mediante relaciones simples y magnitudes conocidas, valores de magnitudes sub-sub-decimales, determinadas por números racionales o por residuos, por ejemplo $(2/3)(5/7)$ de $L = 0.476190476190 \dots$ L, ó $5/7 - 2/3 = 0.0476190476$. A este respecto cabe mencionar que este principio se utiliza para relacionar de forma "exacta", por resonadores $3f$, $5f$, $2/3f$, $5/3f$, etc., la frecuencia de fenómenos heterodinos de luz, con patrones de tiempo, y establecer el nuevo valor del metro con más de 13 cifras significativas de exactitud.

2.1.3 Edad Moderna

No fue sino hasta la revolución industrial cuando los cambios en la tecnologías mecánicas demandaron fuertemente el incremento de exactitud en longitud y sus combinaciones; y así observamos la máquina de Chancellor (1800), que permitía medir incrementos de 0.025 mm. Ver Figura 2.9. Esta tendencia llevó finalmente a la producción de la máquina Withworth (1855), cuya discriminación era de 0.000025 mm. Ver Figura 2.10.

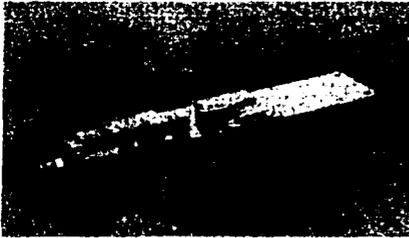


Figura 2.9 Máquina de Chancellor (1800) incluye divisores angulares

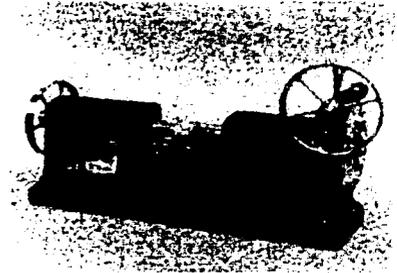


Figura 2.10 Máquina Withworth (1855), cuya discriminación era de 0.000025 mm

La demanda de intercambiabilidad de partes de esta revolución llevó a la creación del concepto de calibres, y de patrones a pasos. Ver figuras 2.11 y 2.12.



Figura 2.11 Calibres de cotas



Figuras 2.12 Empleo de calibres de cotas

Más tarde, esta tendencia de patrones a pasos llevó en 1890 a Carl Edvard Johanson a la conceptualización de conjuntos de patrones de longitud de pasos y tamaños progresivos. Ver figuras 2.13 y 2.14. Este concepto de patrón permite obtener de una manera rápida, longitudes de referencia de muy alta exactitud, ordinariamente mejores que 0.0001 mm, por la simple combinación de diferentes prismas. Además de la versatilidad para formar arreglos de calibres en interiores y exteriores, este recurso aborrió la incertidumbre producida por cambio de dirección de desplazamiento en mecanismos de tornillo.



Figura 2.13 Evolución de calibre a patrón de pasos

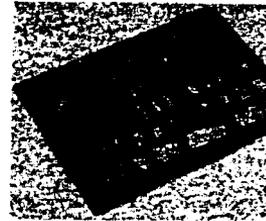


Figura 2.14 Conjunto de bloques patrón o bloques Johanson

Finalmente, los refinamientos en la ingeniería mecánica produjeron las máquinas e instrumentos de medición de más de un eje, entre las que cabe resaltar a la máquina de coordenadas construida por Clark y Robert Moore (1896), ver figura 2.15, y a la máquina "universal" de medición considerada hasta 1975 como el instrumento patrón 3D por excelencia. Ver figura 2.16

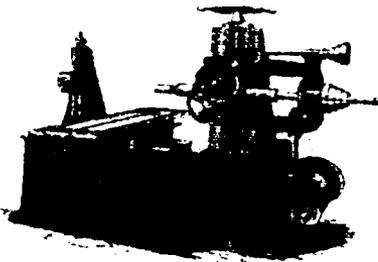


Figura 2.15 Máquina de Clark- Moore (1896) basa su exactitud en la rigidez y exactitud de partes

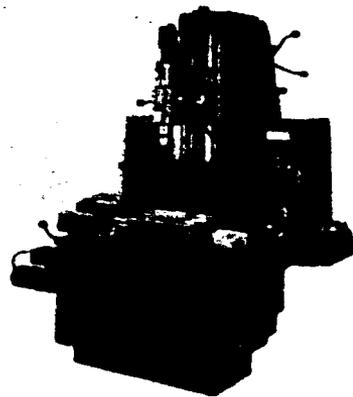


Figura 2.16 Máquina universal Moore

2.2 FUNDAMENTOS MECÁNICOS DE INSTRUMENTACIÓN MODERNA DE ALTA EXACTITUD.

2.2.1 Generalidades

La compilación de principios de diseño mecánico enfocados a: la simplicidad de fabricación, ensamble, intercambiabilidad o mantenimiento de partes, a la funcionalidad de sistemas, a la eficiencia en conversión de energía; a la seguridad de funcionamiento de mecanismos, ha sido un sueño acariciado por diseñadores, a tal grado que se envidia de otras áreas de la ingeniería el que en ellas se pueda recurrir a metodologías de diseño e idealizaciones, pero en mecánica esto no ha sido posible a la fecha. En un esfuerzo de integración de criterios de diseño en sistemas expertos, se han "consagrado" algunos principios como el de "unicidad de función", "byas", "conducción de energía", "embodiment". Sin embargo, en el contexto de la exactitud, éstos no son aplicables, y otros aplicables son generalmente desconocidos, de entre ellos se han podido compilar los siguientes principios de diseño

2.2.2 Principios de diseño

Principio de Abbe: El principio de Ernst Abbe que lleva su nombre, fue formalizado por los años 1890, en que el profesor de óptica De La Universidad de Jena, Alemania, y fundador de la Karl Zeiss, requirió del perfeccionamiento de máquinas para tallado de lentes, así como de mejores mecanismos para la explotación de estas en microscopios, en autocolimadores, o en telescopios. El principio se puede enunciar de la siguiente manera "La minimización de efectos de cabeceo de móviles a lo largo de una corredera, requiere de la localización de escalas o actuadores coaxiales con esta misma corredera, así como de la localización de muestras por medir o fabricar a lo largo de ese mismo eje". Ver figuras 2.17 y 2.18.

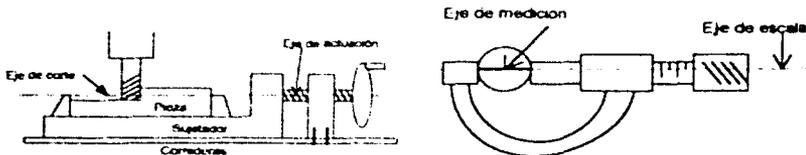


Figura 2.17 La máquina e instrumentos de medición mostrados cumplen con el principio de Abbe al tener coaxialidad entre ejes de medición y de corte con ejes de escala o de actuación.

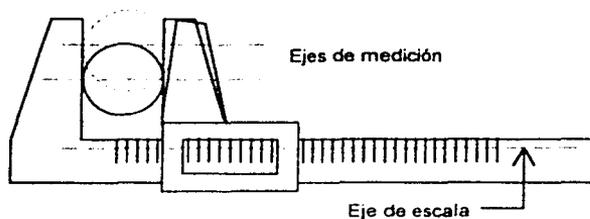


Figura 2.18 El vernier no cumple con el principio de Abbe, al alejarse los ejes de medición y de escala

Principio de periodicidad. Este principio se basa en la posibilidad de comparar escalas, tornillos, ruedas dentadas, prismas angulares, y en general piezas de diseño periódico, con otras piezas del mismo diseño o con diseños de periodicidad múltiplo o sub-múltiplo, a fin de descubrir irregularidades o variaciones, y de cancelarlas o minimizarlas empleando un principio o proceso de correlación. En el caso de piezas angulares, se tiene la posibilidad de encontrar siempre un número de pasos que cierran el círculo, en el caso de escalas o tornillos se tiene la posibilidad de aproximarse a longitudes fijas por subdivisión del paso. El torno de roscas de Da Vinci, y las generaciones de mecanismos posteriores a él, explotaron el principio de periodicidad obteniendo sucesivamente mejores generaciones de instrumentos.

El principio de periodicidad se puede explotar de diversas formas, de tal manera que es posible reproducir el patrón de longitud "metro", por procedimientos fenómenos heterodinos (periódicos), de la radiación de la luz. Entre los fenómenos heterodinos de luz y la distribución de pasos en los tornillos, median las escalas ópticas de longitud, los láseres estabilizados (interferómetro de Michelson), y combinaciones de ellos como el "laser grating". Dada la presencia de muchos fenómenos de tipo dinámico en procesos de fabricación, y en el comportamiento de máquinas, se ha recurrido a la descomposición de fenómenos vibratorios, o de rugosidad, en series de Fourier que facilitan la interpretación de fenómenos, y diagnóstico de causas, así la rugosidad puede descomponerse en series y encontrar un componente que coincida con la periodicidad de un mecanismo.

Principio de desplazamiento de fase. El principio de desplazamiento de fase se emplea conjuntamente con la subdivisión de pasos en tornillos y escalas. En el caso de tornillos, la subdivisión del paso por giros de relaciones fraccionarias de vueltas empleando tambores graduados. Este principio se emplea también cuando se añade una escala "vernier", que permite cuantificar desplazamiento o cercanía con trazos enteros de la escala principal por medio de una escala modificada o "escala vernier".

En la medición de altos niveles de planitud y de muy pequeños incrementos de longitud, se emplean instrumentos ópticos o electrónicos (interferómetros, resonadores capacitivos entre objeto y superficie de control), que permiten discriminar variaciones de fase de una señal periódica de referencia, que se correlaciona con longitud. En el sub-capítulo de sensores de máquinas se describirá una forma de emplear el principio de desplazamiento de fase.

Principio de mínimas restricciones. El principio de mínimas restricciones se emplea para producir ensambles repetibles de cuerpos rígidos, o en mecanismos de corredera en que se desea minimizar esfuerzos internos y deformaciones, y evitar estados hiperestáticos [4]. Un ensamble será repetible si y sólo si tiene una restricción por grado de libertad del movimiento que se quiere suprimir. En los siguientes diagramas se ejemplifica este ensamble de mínimas restricciones:

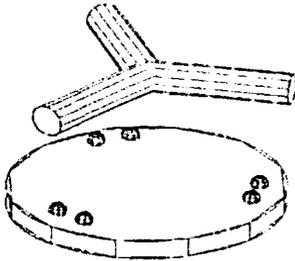


Figura 2 19 Ensamble fijo de mínimas restricciones (6 restricciones)

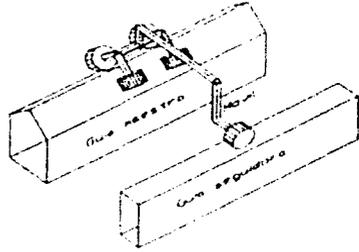


Figura 2 20 Ensamble de móvil sobre guías o correderas, con mínimas restricciones (5)

El principio de mínimas restricciones funciona para condiciones en que los sólidos constituyentes del instrumento pueden considerarse cuerpos rígidos, cuando se consideran propiedades elásticas en dichos cuerpos, en vez de considerar isoestaticidad se consideran condiciones de equilibrio elástico, que en ocasiones pueden ofrecer mayor exactitud de ensamble. Estas cualidades de elasticidad, pueden combinarse con los principios de acción contraria explicados a continuación:

Principio de pre-carga y de acción contraria. Estos principios se emplean en ensambles estáticos y en ensambles dinámicos, en donde es necesaria alta estabilidad de ensambles o condiciones de movimiento [4]. Para ensambles estáticos se emplean parejas de tornillos, de los que el ajuste de transitos o niveles geodesicos para obtener horizontalidad son un ejemplo típico. El empleo de resortes de pre-carga y motores de acción contraria, es ampliamente empleado para compensar o disminuir juego (backlash) entre mecanismos, ganando con ello posibilidades de control reversible de movimientos. En este último caso destacan los medidores de caratula, las mesas de coordenadas, los sistemas de guiado de telescopios, los mecanismos goniométricos para radares, etc.

Principios de rigidez y mínimas deformaciones. Los principios de rigidez para la reducción de deformaciones, no nuevos en el campo de la ingeniería de precisión, se pueden observar en la máquina Moore de la figura 2.16, donde la exactitud de esa generación de instrumentos se obtenía por la adición de masa a las estructuras, pero actualmente la adición de masa implica adición de inercias, por lo que se ha refinado el recurso para llevarla sólo donde es necesaria. De esta manera se han obtenido nuevas geometrías de estructuras, como cascarones, panales, tripodes o arreglos de tripodes, aleaciones espumosas, materiales compuestos, combinaciones de elementos sujetos a compresión y tensión, etc

Principios de rigidez complementarios son sujeción en puntos de Airy. Los puntos de Airy son las posiciones en que hay que localizar una estructura para que su flecha por peso o carga sea mínima



Puntos de Airy

Figura 2.21 Algunos elementos mecánicos se soportan en puntos de mínimas deformaciones llamados puntos de Airy

Estructura Serrurier. En ocasiones se desea minimizar deflexión angular relativa, que no se puede evitar por adición de rigidez, la estructura se diseña entonces para que se igualen y cancelen las flexiones, intentando a su vez minimizar deformaciones transversales. Ver figura 2.22.

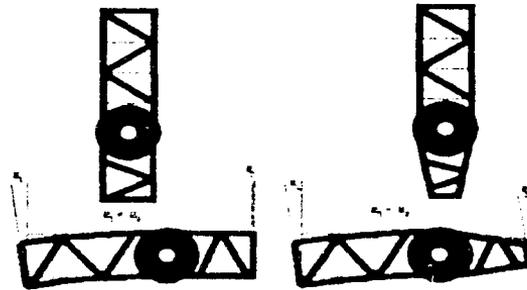


Figura 2.22. El diseño Serrurier logra mantener paralelos los extremos de los brazos de las estructuras

Mecanismos sin fricción. Destacan entre éstos los baleros neumáticos o hidráulicos que no oponen resistencia a la rodadura o deslizamiento, y ofrecen altas capacidades de carga con relativamente bajas presiones de aire o aceite

Actuadores de alta fuerza o alto torque. Destacan entre estos actuadores los servomotores que poseen alto torque, que permiten amplios intervalos dinámicos de velocidades, y con ello evitan o minimizan el backlash al no usar o reducir las cadenas cinemáticas de transmisión. Otra familia de actuadores son los llamados piezoeléctricos, capaces de compensar desplazamientos de hasta unos cuantos nanómetros con un rango de frecuencias desde DC a Mz; y se emplean directamente en la aplicación de fuerzas a muy alta frecuencia, o como dispositivos de control activo para compensar vibraciones. Equivalente de estos actuadores hay también solenoides a menores frecuencias. La actuación por servomotores neumáticos, pistones y diafragmas controlados por microválvulas, esta actualmente en desarrollo con esperanzas de empleo en robótica compacta

2.3.1 CONFIGURACIONES DE MÁQUINAS MULTIEJE

Los arreglos que puede adoptar una máquina multieje pueden variar ampliamente; sin embargo, podemos agruparlas en máquinas de uno, dos, tres, cuatro, cinco ejes; o grados de libertad, y dentro de estos, podemos distinguir los ejes o grados de libertad de desplazamiento, de giro no controlado o sincronizado y de giro sincronizado

Dentro de los mecanismos de un eje podemos mencionar a los taladros verticales sin mesa de coordenadas, con movimiento controlado vertical, el giro de la herramienta no se considera un grado de libertad, pues no es controlado o sincronizado. Ver figura 2.23

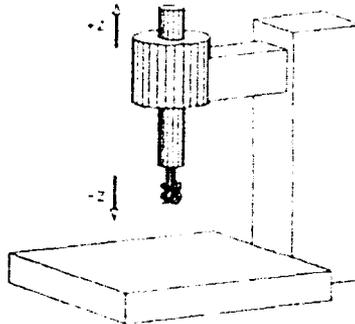


Figura 2.23 Un taladro vertical puede considerarse una máquina de un eje al tener sólo un eje controlado en desplazamiento; refinamientos de este instrumento pueden llevar a movimientos sincronizados para producir roscas.

En el conjunto de máquinas de dos ejes encontramos una variedad de configuraciones y aplicaciones, en que podemos incluir como casos particulares los sistemas de visión o de remoción por láser, pero destacan la información bidimensional y el control de movimientos en dos ejes. Ver figuras 2 24 y 2 25

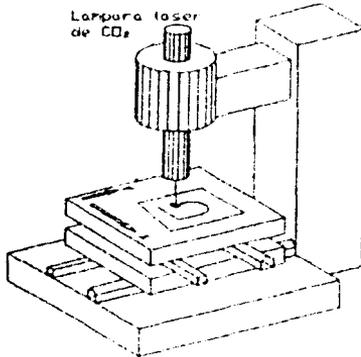


Figura 2 24. El pantógrafo láser posee dos ejes controlados, algunos de ellos permiten enfocar ases muy abiertos, pudiendo emplear en profundidad una tercera coordenada

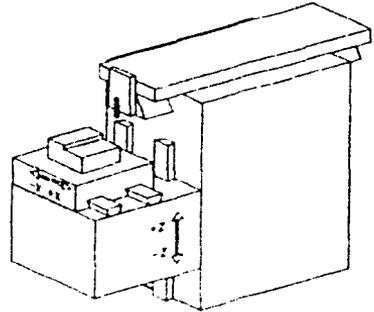


Figura 2 25. El cepillo posee tres movimientos ortogonales, pero el de desplazamiento de la herramienta no permite control fino. Este dispositivo comete grandes errores por su masa y rigidez

En máquinas de tres ejes, tenemos un conjunto mayor de configuraciones, entre las que podemos destacar a la fresadora de tres ejes, a la máquina de medir por coordenadas, los discretizadores goniométricos, y a los pantógrafos 3D. Ver figuras 2 26 a 2 29. Un caso corriente de este último es la fresa de dentista (que a propósito no posee movimientos controlados) que permite una amplia gama de posiciones, y el goniómetro de artistas. Figura 2 29

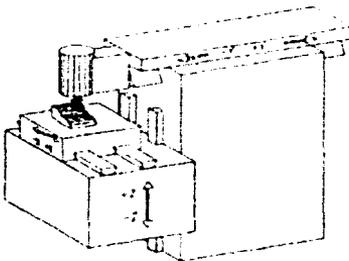


Figura 2 26. Fresadora de tres ejes. Cuando es controlada en CNC permite esculpir superficies.

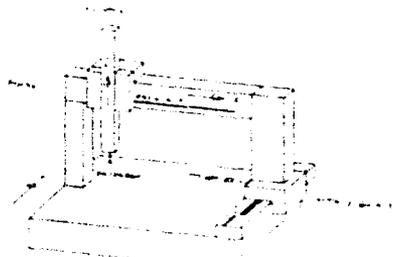


Figura 2 27. Máquina de medir por coordenadas (MMC) de tipo portal.

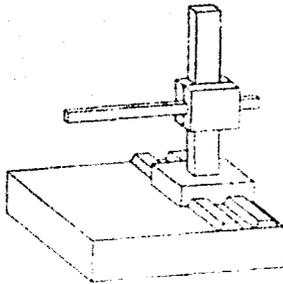


Figura 2.28. Máquina de coordenadas brazo en cantiliver. Esta configuración permite ensamblar arreglos de varios instrumentos en paralelo que interfieren con un solo objeto de medición.



Figura 2.29. Máquina de tipo goniométrico empleada para digitalizar superficies esculpidas. Los números representan respectivamente: 1 base, 2 codificador β 4 codificador γ , 5 palpador

Las máquinas de cuatro ejes generalmente consisten de tres movimientos ortogonales controlados y un cabezal giratorio controlado por pasos o continuamente. Ver figura 2.30

La máquina de cinco ejes posee además un segundo cabezal giratorio perpendicular, con movimiento controlado por pasos o continuamente. Ver figura 2.31. En todos los casos, un eje adicional es el giro de la herramienta con movimientos controlados o en sincronía con alguno de los otros.

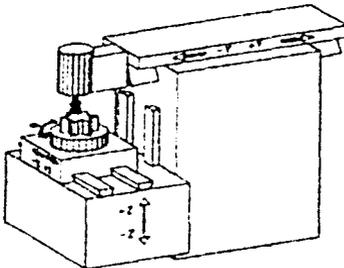


Figura 2.30. Una fresadora de cuatro ejes permite efectuar trabajos de tipo radial-angular-axial

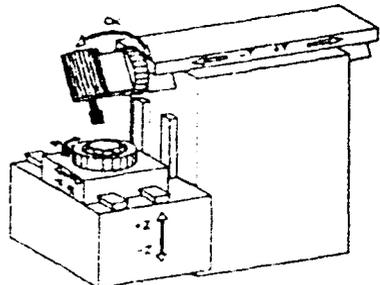


Figura 2.31. Una fresadora de cinco ejes permite ejecutar trabajos de tipo radial-axial-angular de ejes inclinados y no coincidentes

2.3.2 SENSORES

En las máquinas - herramienta tradicionales, y en los procesos de fabricación en serie, no se empleaban dispositivos sensores de movimiento o proximidad para controlar un procesos de fabricación; en los procesos de fabricación de mediana exactitud, se emplearon algunos sensores como dispositivos añadidos a las máquinas, tal es el caso de indicadores de cuadrante de máquinas como Moore, o de procesos "realimentados" como procesos de rectificado. En las máquinas de control numérico de baja calidad, se asocia un desplazamiento por cada paso de movimientos en motores de pasos, lo que no garantiza que para dichos pasos, se produzcan realmente los equivalentes movimientos, sobre todo por backlash.

En máquinas de mayor exactitud, se emplean sensores de movimientos, que permiten controles más finos a los procesos de fabricación. Entre estos últimos mencionemos el codificador inductivo, y el codificador óptico. Ver figuras 2.31 y 2.32.

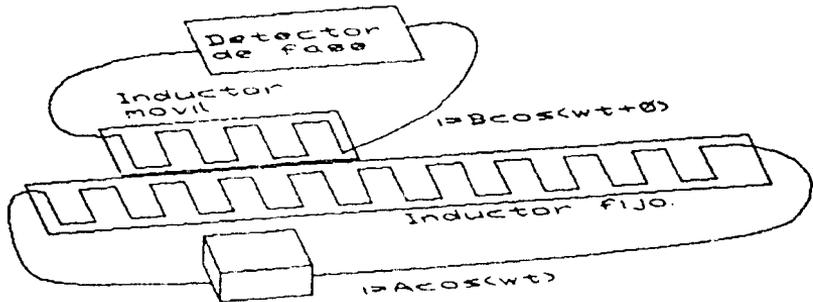


Figura 2.31 Codificador de inductores o inductosin. La medición de desplazamiento se lleva a cabo por medición de desplazamiento de fase entre la señal de referencia y la señal de salida en inductor móvil.

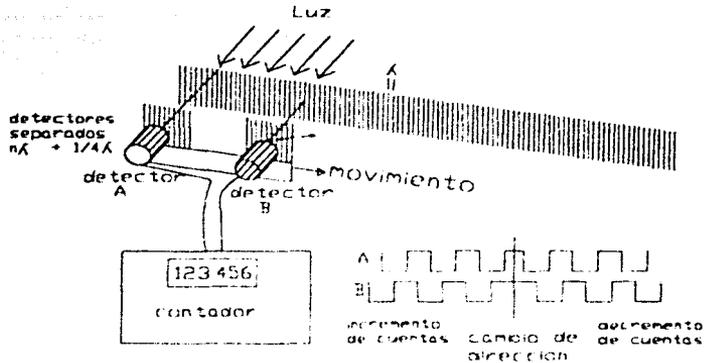


Figura 2.32 Codificador de longitud por rejillas ópticas. Las señales de salida se han filtrado para obtener estados binarios "0" y "1". El desplazamiento de $\lambda/4$ entre rejillas explota el principio de desplazamiento de fase tratado en "principios de exactitud".

Como sensores de longitud particulares al final de las cadenas cinemáticas, encontramos a dispositivos de palpación por apertura de contactos, por vibración y continuos por variación inductiva, y los dispositivos de "proximidad", empleados para una amplia gama de aplicaciones, entre los que se encuentra la cámara de video, que consideraremos un caso particular, empleados todos ellos en máquinas de medir o máquinas de fabricar. Dentro de esta etapa final de las cadenas cinemáticas que podemos decir que pertenecen al *espacio operacional*, se encuentran también las herramientas de corte y de remoción o depósito de material, casos particulares los constituyen los actuadores de alta frecuencia que sirven lo mismo para detectar proximidad que para ver material.

2.3.3 ACTUADORES.

Dentro de la amplísima gama de actuadores empleados para la mejora de exactitud de máquinas multi-eje, podemos contar a actuadores piezoeléctricos, actuadores magnéticos, frenos, motores lineales, pero para los propósitos de manejo de máquinas multi-eje destacan: los motores de pasos y los motores de DC.

Los motores de pasos son ampliamente usados pues facilitan el control de posición de herramientas, y en ausencia de deformaciones y de salto de pasos, se puede asumir que existe una relación lineal entre pasos y posición. El caso más simple consiste en un arreglo impar de polos en un estator por un arreglo par de polos en un rotor (figura 2.33). El estado de posición se determina por la secuencia de polarizaciones en bobinas.

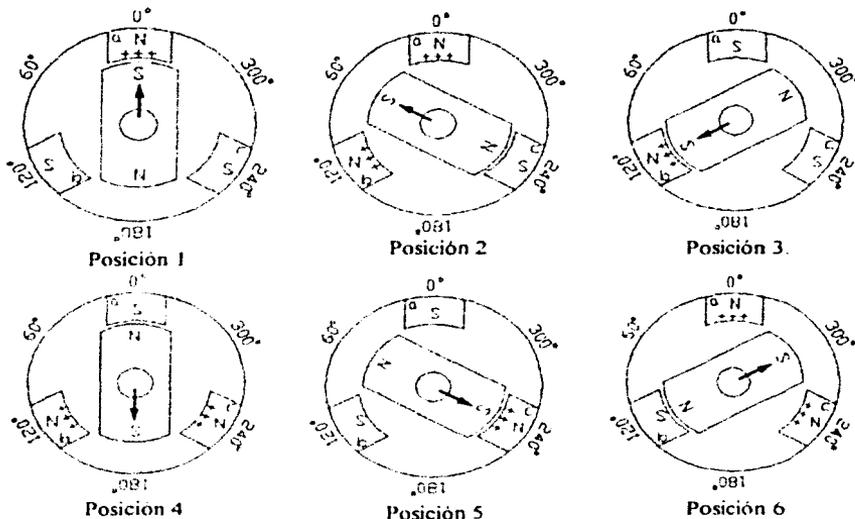


Figura 2.33 Secuencia de tres pasos por cambios en la polarización del estator en un motor de pasos

La secuencias de pasos mostrada se puede obtener por energización positiva de las bobinas *a*, *b* y *c*, con el siguiente orden.

Posición del rotor	Estado bobina a	Estado bobina b	Estado bobina c
1 0°	1	0	0
2 60°	1	1	0
3 120°	0	1	0
4 180°	0	1	1
5 240°	0	0	1
6 300°	1	0	1

2.3.4 FENÓMENOS ESTÁTICOS Y DINÁMICOS.

Los fenómenos estáticos más sobresalientes que son causantes de la pérdida de exactitud son las deformaciones permanentes de rectitud de guías, los errores de distribución de escalas, errores permanentes de tornillos o cadenas de transmisión, y errores de ortogonalidad en ensamblaje. Este grupo de fenómenos estáticos serán más estudiados en el capítulo de análisis de errores; y será objeto de discusión en el análisis de diagnóstico de máquinas

El análisis de los fenómenos dinámicos que ocurren en un instrumento multieje es objeto de investigaciones en diseño de maquinaria y vehículos, micromecánica, mecánica de precisión, robótica, nanotecnología, etc. Consideraciones de este campo mayor tienen que ser analizadas en nuestro instrumento como responsables de parte de la pérdida de exactitud sin ser exhaustivas, ni el objeto principal de esta investigación

Se pueden mencionar los siguientes efectos dinámicos que afectan el comportamiento de una máquina, de menor a mayor complejidad

Juego (backlash). Es el contribuyente principal de la histeresis. Se presenta en máquinas con guías y correderas mecánicas, por la presencia de reductores de velocidad, por efectos de esfuerzos débiles no liberados (fricción), o por ensambles que no respetan principios de mínimas restricciones. Se corrige en parte si se incluyen algoritmos de compensación por dirección de movimiento

Distorsión térmica. La distorsión de los elementos cinemáticos (mesa, puente, carro, columna) por dilatación térmica, se considera un fenómeno dinámico al ser continuamente variable para espacios no controlados, y porque en algunos modelos de comportamiento se le puede asociar con otras deformaciones de origen dinámico [4]. Actualmente se recurre al MEF para estimarla

Deformación elástica. Es la deformación que ocurre por la aplicación de fuerzas para el movimiento. En modelos simples se representa por elementos elásticos unidimensionales, masas concentradas, y fuerzas de actuación constantes, por la segunda ley de Newton y la ley de Hooke, en modelos más complejos requiere de modelado multidimensional (elementos finitos MEF)

Deformación plástica. Es la deformación de tipo no lineal por efectos de desplazamiento, velocidad, y aceleración, que ocurre en elementos de tipo plástico como reductores, bujes, grasa en mecanismos. Es difícil de predecir, y es un componente principal de los errores de histeresis. Varias investigaciones se han concentrado en la modelación de este fenómeno

Deformación por vibraciones. Son deformaciones transitorias producidas por vibraciones, ordinariamente transmitidas a través de piso, o internamente por la actuación de motores, reductores y efectos de rodadura. Aunque estas deformaciones son de la misma naturaleza que las deformaciones elásticas y plásticas, requieren para su análisis de la modelación de sus elementos cinemáticos como osciladores acoplados o como líneas de transmisión. Investigaciones en este tipo de efectos han llevado a la sustitución de cojinetes mecánicos por cojinetes neumáticos, y al diseño de bujes porosos

2.3.5 CADENAS DE CONTROL

A fin de entender la importancia de los modos de control en máquinas de tres ejes, es necesario distinguir los propósitos del control, para el caso de los procesos de manufactura, el

objeto de las rutinas de control es para proteger las herramientas de radios de giro no permitidos, proteger partes terminadas de posibles daños de herramienta, de asegurar el no traspaso de las regiones de maximo material, a fin de cumplir con tolerancias, o de optimización de procesos de corte. Estos aspectos de control pertenecen más bien al diseño de trayectorias y velocidades en el "espacio articular" de la máquina, que a los aspectos dinámicos responsables de su exactitud, aunque estan relacionados.

Como se discutirá posteriormente en el analisis de errores de maquinas multieje, éstos son los principales responsables de su perdida de exactitud. Destacan entre otros, los efectos de: escala, rectitud, ortogonalidad, backlash, efectos de inercia, efectos viscosos y efectos térmicos. Para propósitos de alta exactitud, la adición de masa o rigidez dejaron de ser la solución hace ya una generación de instrumentos. La modelación de éstos fenómenos y su predicción permiten ahora conseguir la exactitud no alcanzada por rigidez o por perfección de maquinados y ensambles.

Dentro de los fenómenos que se pretenden controlar podemos agrupar aquellos que son repetibles, y son una propiedad del instrumento, y aquellos que no son repetibles y son una combinación de propiedades del instrumento con el modo de operación, y con las condiciones ambiente, también podemos llamarlos fenómenos estaticos y cuasiestaticos, para coincidir con la clasificación de Soons[5].

Dentro de los modos de control para propósitos de exactitud podemos agrupar los siguientes.

Lazo abierto. Este tipo de control se emplea en maquinas CNC y se asume que las deformaciones son despreciables. Se asocia un desplazamiento por n impulsos de motores de pasos en el espacio articular. Es necesario señalar que este tipo de control no absorbe ninguno de los errores mencionados previamente.

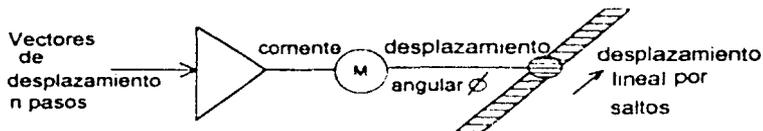


Figura 2.34 Lazo de control abierto en máquinas CNC

Existe un caso particular en lazo abierto, pero en realidad es cerrado por la intervención humana; ya sea que se empuja directamente sobre puente, carro y columna, ya operados por mecanismos ya operados por joy sticks, en todos ellos la posición alcanzada depende de la sensibilidad o experiencia del operador. Dentro de estos casos tendremos lazos de control abiertos o cerrados dependiendo de las técnicas empleadas para alcanzar posiciones, así se puede alcanzar una posición de referencia con poco error si se incluyen palpadores, topes, lámparas o amperímetros que anuncian contacto eléctrico, etc. En general no se tendrá control en deformaciones finas durante el período de desplazamiento.

Lazo cerrado con señal de codificadores de longitud. Dentro de esta categoría se encuentran varios modos de control, siendo los más empleados los siguientes:

Control proporcional realimentado con la señal que proporcionan los codificadores de longitud. Permite absorber en parte los errores de backlash, deformaciones térmicas cuando se emplean escalas inmunes a temperatura, e histéresis.

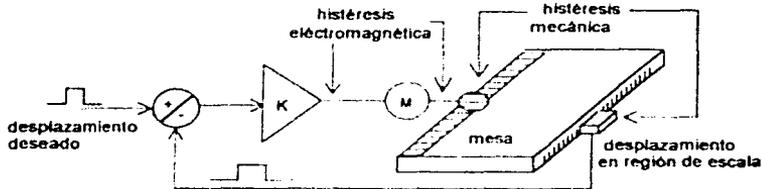


Figura 2.35 Control de lazo cerrado con retorno de información de posición de escalas.

Todas estas deformaciones son absorbidas en la region de localización de escalas, como se refirió al inicio de este capítulo, al no satisfacer el principio de Abbe (coaxialidad de eje de medición y eje de escalas), las deformaciones producidas en el resto de elementos quedarán fuera de control.

Control proporcional integral El diagrama de este control es similar al anterior, excepto que la constante del amplificador K , debería multiplicarse por la constante de tiempo t . Este tipo control permite igualar las cuentas de entrada y salida, cuando no se rebasa el umbral de desplazamiento del sistema. Esta situación se presenta por juegos, histéresis, deformaciones elástico-plásticas. Dado que se rompe con el principio de Abbe, puede producir una sobrecompensación. Es importante señalar, que los efectos de cabeceo no quedan eliminados, sobre todo en los cuerpos que continúan la cadena cinemática.

Control de perfil trapezoidal en velocidad on-off Este tipo de control tiene curvas predefinidas de velocidad, y se considera cerrado pues desencadena acciones de retorno una vez que se registra la palpación. Se presuponen bajas deformaciones bajo operación de baja velocidad, por lo que se eligen dos velocidades, de aproximación y de palpación. Requiere de un plan previo aproximado de palpaciones.

Como en casos anteriores, no controla los efectos de backlash, ni los efectos de cabeceo asociados, pero minimiza los efectos de deformación por velocidad (resistencia a la rodadura, resistencias plásticas). Es importante anotar que la aplicación de fuerza no cesa y es necesaria para mantener la velocidad. Ver figuras 2.36 y 2.37.

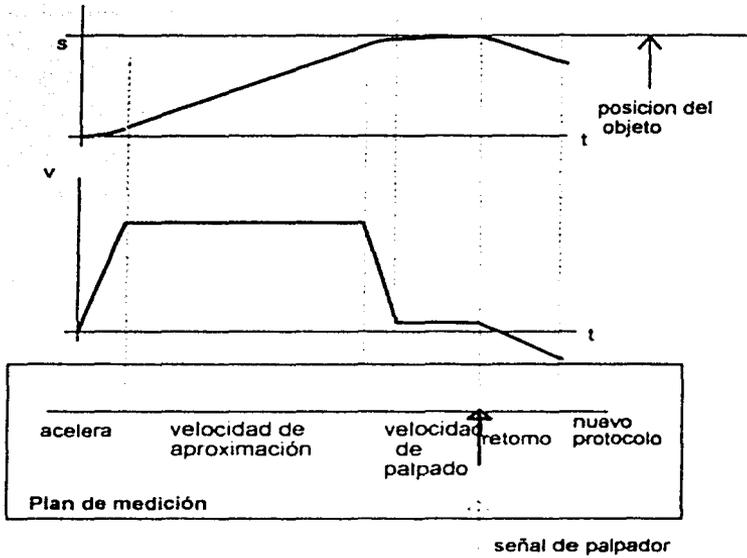


Figura 2.36. Control de perfil trapezoidal en velocidad on-off.

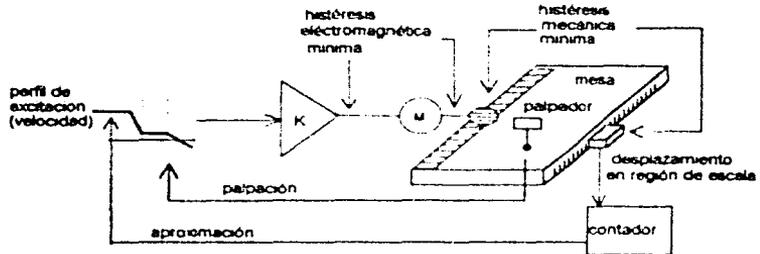


Figura 2.37. Lógica de operación: el contador permite definir los perfiles de aproximación, y el palpador define el retorno

Control de velocidad con perfil trapezoidal con retorno. Este modo de control igual que el anterior, se basa en la minimización de deformaciones minimizando excitación de motores al momento de la palpación. La diferencia de este perfil es que al detectarse la palpación, se desencadena el perfil de aceleración y velocidades 4 → 5, observándose que al momento del nuevo cierre de contactos no hay aceleración y esta retornando por inercia. En ausencia de excitación de motores la deformación elástica de mecanismos es inexistente, la deformación viscosa desaparece al no restituirse el amortiguamiento (observar el perfil de velocidad 4 → 7); el backlash se minimiza, al aplicar el escalón de aceleración en 5. Zeiss afirma aplicar este modo de control en las máquinas de nivel laboratorio

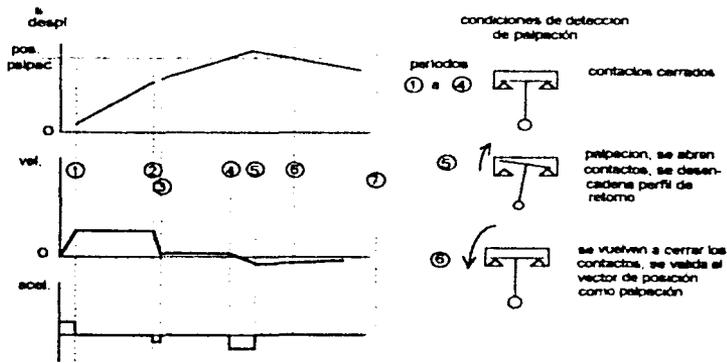


Figura 2.38. Control de perfil trapezoidal en velocidad.

Control de perfiles trapezoidales de velocidad y compensación por modelos de predicción. Este modo de control puede emplear los perfiles de excitación cero o excitación baja en motores descritas; pero basa su exactitud en el empleo de modelos de corrección basados en las características mecánicas, historia de operación, condiciones de temperatura, historia de calibraciones. Ver figura 2.39. Los modelos empleados en la predicción de deformaciones, según la literatura publicada, se basan básicamente en redes neuronales [B.2-2], en predicciones de deformación térmica por elementos finitos, o en polinomios de correlación entrada salida dirección y movimiento por eje.

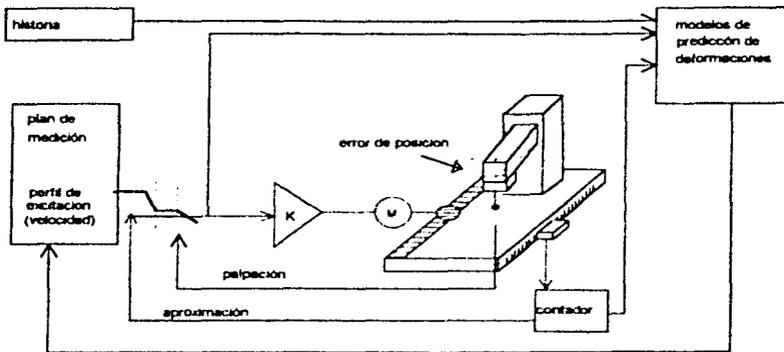


Figura 2.39. Control de perfil trapezoidal en velocidad, y corrección de posición por modelos de predicción.

CAPITULO III

CONCEPTOS BÁSICOS DE ERROR, EXACTITUD E INCERTIDUMBRE, EN MECANISMOS MULTIEJE.

ANÁLISIS GENERAL DE ERRORES EN UN INSTRUMENTO MULTIEJE.

ERRORES DINÁMICOS Y SU PROPAGACIÓN; METODOLOGÍA GENERAL.

EVALUACIÓN Y CRÍTICA DE MODELOS DE PROPAGACIÓN.

3.1 ANÁLISIS GENERAL DE ERRORES EN UN INSTRUMENTO MULTIEJE.

Consideraciones Generales.

Ordinariamente la exactitud de instrumentos de medición no se discute, y en general las tareas de verificación del comportamiento de las máquinas multieje están fuera del alcance de los operadores, estas situaciones parten la mayoría de las veces del desconocimiento o dificultad para distinguir exactitud y discriminación, y otras veces del mito que la exactitud es un atributo in verificable con pruebas sencillas, y que solo los expertos con instrumentos sofisticados pueden realizar.

Sin embargo aunque escasos, existen los usuarios de laboratorios de investigación en que se desarrollan nuevas máquinas o nuevas aplicaciones, donde el control básico de máquinas, en los perfiles de velocidades y aceleraciones, fuerzas de aplicación y en compensación térmica, es tomado en cuenta para su perfeccionamiento o para la mejor explotación de ellas. En este contexto vale la pena mencionar que existen actualmente sistemas de investigación, desarrollo y aplicaciones industriales, en el que destaca el grupo Cranfield alrededor de la Universidad de Cranfield, Inglaterra, se dedica a emprender proyectos de precisión para industrias estratégicas.

Sin embargo, la mayoría de usuarios tienen que confiar en las promesas de exactitud que ofrecen vendedores, en el mantenimiento y pruebas que en el mejor de los casos estos mismos ofrecen, o en evaluadores públicos autorizados para dictaminar el cumplimiento de la exactitud de los instrumentos para *calificarlos*, cuando un sistema de calidad preve y cuenta con estos peritos. Para este propósito se han desarrollado últimamente un conjunto de normas y procedimientos de evaluación de instrumentos multieje, que se han compilado en el Anexo B, y que recomendamos consultar. En estas consideraciones y los propósitos de esta tesis, es necesario distinguir los errores en sus distintas naturalezas, sus fuentes y sus efectos.

CAPITULO III

CONCEPTOS BÁSICOS DE ERROR, EXACTITUD E INCERTIDUMBRE, EN MECANISMOS MULTIEJE.

ANÁLISIS GENERAL DE ERRORES EN UN INSTRUMENTO MULTIEJE.

ERRORES DINÁMICOS Y SU PROPAGACIÓN; METODOLOGÍA GENERAL.

EVALUACIÓN Y CRÍTICA DE MODELOS DE PROPAGACIÓN.

3.1 ANÁLISIS GENERAL DE ERRORES EN UN INSTRUMENTO MULTIEJE.

Consideraciones Generales.

Ordinariamente la exactitud de instrumentos de medición no se discute, y en general las tareas de verificación del comportamiento de las máquinas multieje están fuera del alcance de los operadores, estas situaciones parten la mayoría de las veces del desconocimiento o dificultad para distinguir exactitud y discriminación, y otras veces del mito que la exactitud es un atributo inverificable con pruebas sencillas, y que solo los expertos con instrumentos sofisticados pueden realizar

Sin embargo aunque escasos, existen los usuarios de laboratorios de investigación en que se desarrollan nuevas máquinas o nuevas aplicaciones, donde el control básico de máquinas, en los perfiles de velocidades y aceleraciones, fuerzas de aplicación y en compensación térmica, es tomado en cuenta para su perfeccionamiento o para la mejor explotación de ellas. En este contexto vale la pena mencionar que existen actualmente sistemas de investigación, desarrollo y aplicaciones industriales, en el que destaca el grupo Cranfield alrededor de la Universidad de Cranfield, Inglaterra, se dedica a emprender proyectos de precisión para industrias estratégicas

Sin embargo, la mayoría de usuarios tienen que confiar en las promesas de exactitud que ofrecen vendedores, en el mantenimiento y pruebas que en el mejor de los casos estos mismos ofrecen, o en evaluadores públicos autorizados para dictaminar el cumplimiento de la exactitud de los instrumentos para *calificarlos*, cuando un sistema de calidad prevé y cuenta con estos peritos. Para este propósito se han desarrollado últimamente un conjunto de normas y procedimientos de evaluación de instrumentos multieje, que se han compilado en el Anexo B, y que recomendamos consultar. En estas consideraciones y los propósitos de esta tesis, es necesario distinguir los errores en sus distintas naturalezas, sus fuentes y sus efectos

3.1.1 CLASES DE ERRORES.

La literatura científica resume los errores como aquellos que se conocen y se pueden predecir o **errores sistemáticos**, y aquellos que no se conocen y no se pueden predecir o **errores aleatorios**. sin embargo, en el campo de estudio que nos ocupa tenemos que señalar que los errores aleatorios lo son en la medida en que no tenemos control sobre las circunstancias en que los procesos se llevan a cabo, o en el comportamiento y propiedades desconocidos de las máquinas. En el caso de esta investigación, es necesario distinguir además entre

Errores de operación en instrumentos multieje, en este grupo abarcamos aquellos errores que se cometen por prácticas defectuosas de medición o fabricación, como pueden ser operaciones bajo efectos severos de vibraciones, suciedad, gradientes térmicos, por idealizaciones falsas acerca de planos o ejes principales, por elección ineficiente de trayectorias de medición o corte, solución ineficiente de relaciones geométricas entre elementos geométricos (por ejemplo intersecciones sesgadas entre cono y cilindro), truncamiento o redondeo de cifras, etc.

Errores fuente propios de una máquina multieje Son aquellos que se pueden considerar una propiedad de tipo estático en los componentes de los instrumentos. La literatura de normalización, así como autores de diversos centros de investigación y universidades, señalan veintiuno fuentes de error para máquinas con arquitecturas simples de tres ejes, siendo estos error de escala a lo largo de cada eje (scale), error de rectitud o traslación perpendicular (straightness) en dos planos por eje, cabeceo en dos planos por eje (pitch and yaw), y giro al rededor de cada eje (roll) [4] Ver figura 3.1

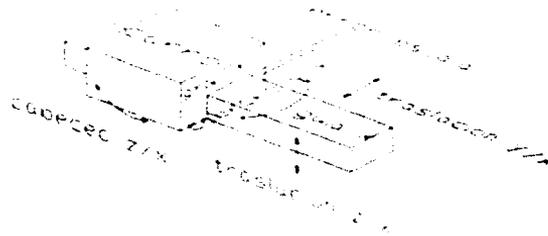


Figura 3.1. Errores fuente por eje

Y en arreglos multi-dimensionales, ortogonalidad entre cada par de ejes. Para el caso de máquinas de tres se producen un total de veintiuno fuentes de error considerados independientes

Errores fuente no considerados por la mayoría de los autores ni por las pruebas normalizadas, que contribuyen de manera decisiva en la calidad de una medición o tarea de

fabricación destacan: planitud de mesa cuando esta es tomada como referencia, paralelismo entre mesa y mecanismos x , y , errores de esfericidad en palpadores o coaxialidad de herramientas, diámetro real y nominal de los mismos, umbrales de palpación de sensores o deformación elástica de herramientas, errores de calibración en patrones de puesta a punto (set up). Ver figuras 3.2 y 3.3 La forma en que influirán de forma sistemática estos últimos tres, dependerá de las tareas específicas, así, acortarán medidas en un objeto, y las alargarán en su complemento booleano (ranura y costilla), y no influirían para tareas diferenciales simples hacia $+x$, $+y$, $+z$, o hacia $-x$, $-y$, o $-z$. Ver figura 3.4.

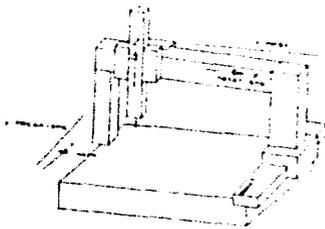


Figura 3.2. Errores de paralelismo entre mesa y mecanismos xy .

umbrales diferentes en cada dirección

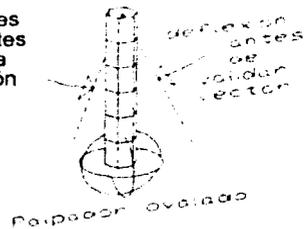


Figura 3.3. Errores por defectos de palpado.

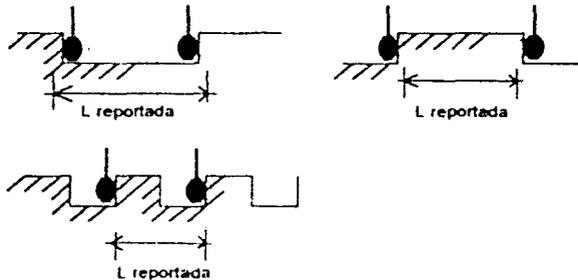


Figura 3.4. Casos de errores de tamaño y deformación de palpadores o de herramientas.

Errores propagados. Son aquellos que se forman en el seno del volumen de trabajo de la máquina, ya sea por la contribución de errores fuente, o por fenómenos dinámicos presentes durante los procesos. Un resumen no exhaustivo de errores en una máquina de tres ejes puede representarse en la figura 3.5. En dicha figura se están representando los 21 fuentes

de error en su componente sistemática, su propagación a la medición en el volumen, y errores de tipo aleatorio cuyas magnitudes y distribuciones pueden ser diferentes para cada posición y cada dirección en forma independiente

A excepción de los errores de ortogonalidad, todos los demás requerirán de **modelos no lineales** para su representación e interpolación. Esta cualidad de no linealidad cobrará mas importancia en posteriores análisis.

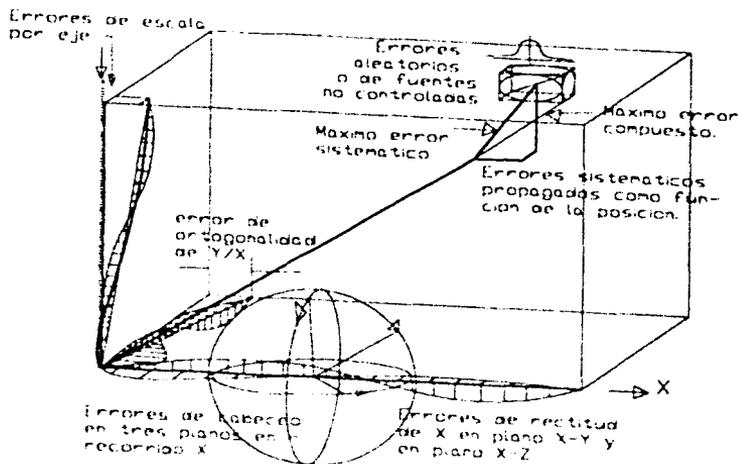


Figura 3.5 Cubo resumen de errores.

Una clase de errores tomada frecuentemente como de tipo sistemático por unos, y como de tipo aleatorio por otros, es la histeresis, y contribuye de manera notable en el presupuesto final de errores

En la instrumentación idonea para la determinación de los 21 errores fuente destaca el sistema láser HP, que funciona bajo principios de interferencia de luz, y arreglos ópticos (prismas, espejos) que acondicionan el rayo para interpretar como longitud o ángulo tales fenómenos de interferencia [6]

3.1.2 ANÁLISIS DE PROPAGACIÓN DE ERRORES.

La propagación de errores en un mecanismo puede manejarse de dos maneras

- a) La propagación de $21+n$ errores fuente considerando sus componentes sistemática y aleatoria, como **aportadores a una incertidumbre final.**

b) La propagación de errores fuente sistemáticos en forma independiente de los aleatorios, cuyo resultado es una **medida con error sistemático conocido, con posibilidad de ser corregido**, cuando se han definido las ecuaciones de propagación

Es importante anotar en este lugar, que varios modelos de propagación se han desarrollado para presupuestar la incertidumbre final, sin embargo hay que anotar que una vez corregidas las fuentes sistemáticas, la principales fuentes de error no provienen de esos 21 errores fuente, sino de comportamientos dinámicos, más difíciles de analizar y resolver

Presupuesto de incertidumbres a partir de errores fuente.

Considerando que las incertidumbres ó errores limite se definen o estiman con un intervalo de confianza (ordinariamente 96%) de escala por eje, ortogonalidad por par de ejes, rectitud por eje, cabeceo en dos planos por eje, y giro por eje (ver figura 3 6), se puede elegir la siguiente terminología para representarlas

S_{c_x} , Incertidumbre de escala del eje x
 S_{c_y} , Incertidumbre de escala del eje y
 S_{c_z} , Incertidumbre de escala del eje z

$Ort_{x,y}$, Incertidumbre de ortogonalidad entre ejes x e y
 $Ort_{x,z}$, Incertidumbre de ortogonalidad entre ejes x e z
 $Ort_{y,z}$, Incertidumbre de ortogonalidad entre ejes y e z

$T_{x,y}$, Incertidumbre de rectitud (traslación) de la guía x en plano x-y
 $T_{x,z}$, Incertidumbre de rectitud de la guía x en plano x-z
 $T_{y,x}$, Incertidumbre de rectitud de la guía y en plano y-x
 $T_{y,z}$, Incertidumbre de rectitud de la guía y en plano y-z
 $T_{z,x}$, Incertidumbre de rectitud de la guía z en plano z-x
 $T_{z,y}$, Incertidumbre de rectitud de la guía z en plano z-y

$C_{x,y}$, Incertidumbre de cabeceo del eje x el plano x-y
 $C_{x,z}$, Incertidumbre de cabeceo del eje x el plano x-z
 $C_{y,x}$, Incertidumbre de cabeceo del eje y el plano y-x
 $C_{y,z}$, Incertidumbre de cabeceo del eje y el plano y-z
 $C_{z,x}$, Incertidumbre de cabeceo del eje z el plano z-x
 $C_{z,y}$, Incertidumbre de cabeceo del eje z el plano z-y

Rll_x , Giro (roll) del móvil alrededor de x (plano y-z) cuando se mueve a lo largo de x

Rll_y , Giro del móvil alrededor de y (plano x-z) cuando se mueve a lo largo de y

Rll_z , Giro del móvil alrededor de z (plano y-z) cuando se mueve a lo largo de z

Un mecanismo de tres cuerpos rígidos en que el cuerpo x soporta al cuerpo y, y éste soporta cuerpo z, puede ser representado por la figura 3.6

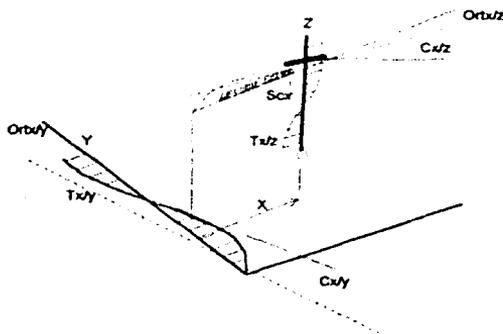


Figura 3.6. Incertidumbres en para una máquina tipo portal.

la propagación de incertidumbres de primer orden en el seno del volumen es expresada por:

$$\sigma_x = \sqrt{Sc_x^2 + T_{x,y}^2 + T_{x,z}^2 + xOrt_{x,z}^2 + xORt_{x,z}^2 + xC_{x,y}^2 + xC_{x,z}^2} \quad (3.1)$$

$$\sigma_y = \sqrt{Sc_y^2 + T_{y,x}^2 + T_{y,z}^2 + yOrt_{y,z}^2 + yORt_{y,z}^2 + yC_{y,x}^2 + yC_{y,z}^2 + zRII_y} \quad (3.2)$$

$$\sigma_z = \sqrt{Sc_z^2 + T_{z,x}^2 + T_{z,y}^2 + zOrt_{z,x}^2 + zORt_{z,x}^2 + zC_{z,x}^2 + zC_{z,y}^2 + xRII_z} \quad (3.3)$$

En este análisis no se han incluido las influencias de errores en segundo orden como el giro (roll) del eje z (columna) en ninguna de las incertidumbres, pues se considera que la separación de palpadores del eje principal z, o errores de coaxialidad de herramientas con dicha columna es despreciable, y tal giro no producirá efectos de amplificación.

Presupuestación de errores propagados para fines de corrección

Para este propósito es necesario establecer si los errores de rectitud y giro deben ser considerados independientes, pues mientras que para un móvil cuyos apoyos coinciden con una probable periodicidad de error de la guía y los errores de rectitud no producen cabeceo, para móviles de base corta producirán gran amplificación de cabeceo. Ver figura 3.7.

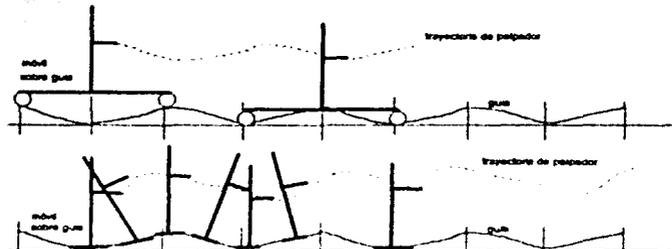
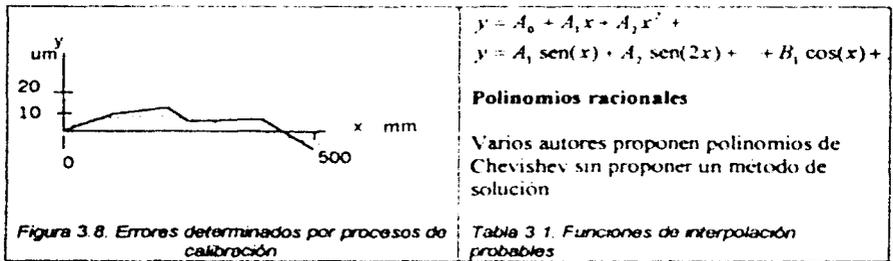


Figura 3.7 Casos extremos de desvío de guías y acoplamiento de móviles.

El caso de cinemática no lineal se complica al tener que considerar formas de ensamble de móviles, pero se puede simplificar el análisis de propagación si se consideran ensambles ortogonales o de desvío ortogonal constante, en el caso de la figura se supone un móvil siempre tangente a la guía

Ordinariamente la forma de una guía se obtiene por un proceso de calibración directo, para los que existe instrumentación y métodos especializados; pero para los fines de esta tesis, los maquinados simples deberán sustituir tales instrumentos y métodos. Para los fines de propagación cinemática de errores, no es práctico el empleo de deformaciones tal como se reportan del resultado de una prueba de calibración según la figura 3.8, pues como se observa en la misma, estas cartas son segmentos lineales discontinuos, y no permiten establecer funciones de propagación por la bivaluación los puntos de intersección de esos segmentos. Para fines de establecimiento de funciones de propagación es necesario modelar (línea punteada) la forma de la guía con funciones continuas y derivables como las de la tabla 3.1.



Una vez que se ha obtenido la función que modela la guía de forma continua, es necesario establecer las funciones de posición de un móvil acoplado a la guía, como se aprecia de las figura 3.10 y tabla 3.1

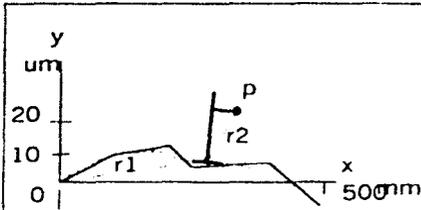


Figura 3.10 Función de error interpolada para propagación de error en un móvil.

$r_1^u =$ vector r_2 para no inclinación
 $|r_2| =$ val. abs. de $r_2 = cte.$ para mov $y = 0$

$$y' = \frac{\partial y}{\partial x}$$

$$\phi = \tan^{-1}(y')$$

$$r_1 = xi + y(xr)j$$

$$r_2 = r_1^0 + r_2^1 \sin(\phi)i + r_2^2 (1 - \sin(\phi))j$$

$$p = r_1 + r_2$$

Tabla 3.2 Funciones para el cálculo de la posición p de herramienta o palpador.

Y para un móvil montado en una segunda guía no recta, tendríamos que calcular tantos polinomios de la guía transformada como posiciones de la segunda guía

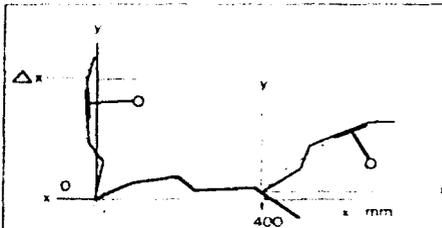


Figura 3.11 Posiciones de un móvil sobre una segunda guía no recta

$$\Delta x(0) = A_0(0) + A_1(0)x + A_2(0)x^2 + \dots$$

$$\Delta x(400) = A_0(400) + A_1(400)x + A_2(400)x^2 + \dots$$

$$\Delta x(x) = A_0(x) + A_1(x)x + A_2(x)x^2 + \dots$$

Tabla 3.3 Funciones que definen la segunda guía transformada, respecto al sistema X, Y, para cada x.

3.2 ERRORES DINÁMICOS Y SU PROPAGACIÓN; METODOLOGÍA GENERAL.

El modelo mas general que describe la propagación de errores encontrado en la literatura técnica es el de Soons [5] e incluye errores constantes y no constantes. Este modelo además se adapta a mecanismos de cadenas cinemáticas en paralelo (util en maquinas con dos husillos o MMC's de tipo portal), a maquinas ortogonales, polares o combinaciones, a errores constantes, a errores variables y a errores de ensamble.

Por su importancia y generalidad de este modelo se considera obligado hacer un análisis para ser considerado como herramienta en el objetivo de la tesis.

3.2.1 MODELO GENERAL DE SOONS

El modelo de Soons está basado en la intención de establecer una metodología general de aproximación y propagación de errores en una máquina multieje. Para ello establece que pueden existir máquinas con cadenas cinemáticas en paralelo, considera que de los errores que contribuyen al error final podemos distinguir los estáticos o permanentes y los cuasiestáticos, de entre los que destaca la dilatación térmica, la deformación elástica y la variabilidad de ensambles, finalmente propone como modelos de errores fuente estáticos a los polinomios pieza maestra "..." o piecewise polynomials del inglés.

Para establecer la propagación de errores, Soons propone una máquina compuesta de $m + n$ cuerpos rígidos en dos ramas "rama a" de m cuerpos y "rama b" de n cuerpos, inicialmente considerados como cuerpos rígidos. Ver figura #3.12.

El sistema de referencia es una estructura base a partir de la cual se apoya la rama a y la rama b, ambas ramas terminan respectivamente en la herramienta y en la pieza. Llama al sistema (frame) final de la herramienta sistema tl (tool) y al de la pieza wp (workpiece).

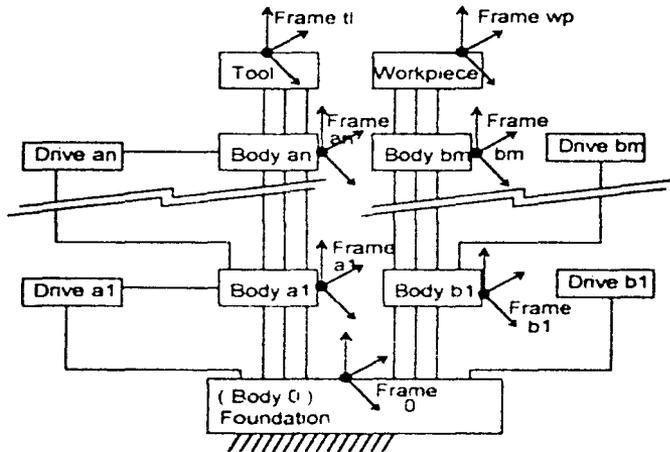


Figura 3.12. Nomenclatura de Soons para los sistemas inicial, finales e intermedios de una máquina multieje con $n + m$ cuerpos en paralelo.

Las líneas verticales que parten de la cimentación o del cuerpo 0 de la máquina, representan las distintas maneras en que puede transmitirse error al primer cuerpo, la línea que llega al

cuerpo *a*1 por el *drive a*1 representa el error por el control posicional de ese cuerpo. El cuerpo *an* será afectado de las fuentes de las cadenas entre el cuerpo 0 y en cuerpo *n*.

Propagación de errores estáticos.

Soons considera como errores estáticos aquellos que permanecen por largo tiempo, y son independientes del modo de operación

Las relaciones que habrá entre dos puntos *^aP* y *^lP* de los cuerpos *k*, *l*, expresada en coordenadas homogéneas será:

$${}^a P = {}^a T_{l,l} P \tag{S.1}$$

donde

$${}^a T_l = \begin{bmatrix} {}^a R_l & {}^a t_l \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{S.2}$$

$${}^a P = [{}^a P_x \quad {}^a P_y \quad {}^a P_z \quad 1]^T \tag{S.3}$$

Nota: Las ecuaciones de Soons las identificamos con el prefijo "S".

En este sistema la sub-matrices *^aR_l* y *^at_l* representan las inclinaciones de la estructura *l* con respecto a la estructura *k*, y la traslación del origen de *l* respecto al sistema *k* respectivamente

Y la transformación inversa puede ser expresada:

$${}^l P = {}^l T_a {}^a P \tag{S.4}$$

$${}^l T_a = \begin{bmatrix} -{}^a R_l^T & {}^a t_l \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \tag{S.5}$$

Las relaciones de transformación aplicadas sucesivamente a través de *n* cuerpos en la rama *a*, y de *m* cuerpos en la rama *b*, nos permitira obtener la matriz de posiciones del sistema herramienta respecto del sistema pieza (Tool ó tl, y workpiece o wp):

$$\begin{aligned} {}^{wp} T_a &= {}^{wp} T_{0,0} T_a \\ &= {}^{wp} T_{0,n} \prod_{i=0}^{n-1} ({}^a T_{i,i+1}) \prod_{j=1}^m ({}^{wp} T_{j,j+1}) {}^{wp} T_a \end{aligned} \tag{S.6}$$

Puede notarse desde las ecuaciones S.1 y sucesivas, que el sistema contempla cualquier tipo de movimiento entre sistemas, ya sea rotacional, traslacional o ambos; por lo que puede ser aplicado a robots articulados, manipuladores, máquinas herramienta, ó cualquier dispositivo de cualquier número de articulaciones o cuerpos soportados

Hasta S.6, las transformaciones expresadas pertenecen a transformaciones nominales o libres de error

Para un paso de transformación donde el cuerpo k soportado en el cuerpo $k-1$, tiene errores traslacionales a lo largo de los ejes x, y, z respectivamente, llamados:

$${}_{k-1}e_{kx}, {}_{k-1}e_{ky}, {}_{k-1}e_{kz},$$

y errores rotacionales alrededor de los ejes x, y, z llamados:

$${}_{k-1}\epsilon_{kx}, {}_{k-1}\epsilon_{ky}, {}_{k-1}\epsilon_{kz},$$

las relaciones de transformaciones nominales (${}_{k-1}T_k$), en actuales ó con errores (${}_{k-1}T_{ac,k}$) será:

$${}_{k-1}T_{ac,k} = {}_{k-1}T_k (I + {}_{k-1}\delta T_k) \quad (S.7)$$

donde: I es la matriz identidad 3×3

$$y \quad {}_{k-1}\delta T_k = \begin{bmatrix} 0 & -{}_{k-1}\epsilon_{kz} & {}_{k-1}\epsilon_{ky} & {}_{k-1}e_{kx} \\ {}_{k-1}\epsilon_{kx} & 0 & -{}_{k-1}\epsilon_{kz} & {}_{k-1}e_{ky} \\ -{}_{k-1}\epsilon_{ky} & {}_{k-1}\epsilon_{kx} & 0 & {}_{k-1}e_{kz} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (S.8)$$

ó:

$${}_{k-1}T_{ac,k} = \begin{bmatrix} 1 & -{}_{k-1}\epsilon_{kz} & {}_{k-1}\epsilon_{ky} & {}_{k-1}e_{kx} \\ {}_{k-1}\epsilon_{kx} & 1 & -{}_{k-1}\epsilon_{kz} & {}_{k-1}e_{ky} \\ -{}_{k-1}\epsilon_{ky} & {}_{k-1}\epsilon_{kx} & 1 & {}_{k-1}e_{kz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (S.9)$$

Propagación de errores cuasiestáticos.

En esta categoría, Soons considera aquellos que pueden estimarse en base a ensayos o modelos de predicción, y comprenden fenómenos de rigidez, de deformación térmica y de

ensambles; y producirán las matrices de transformación: ${}^k E$, ${}^l E$, y ${}^m E$, respectivamente. Las transformaciones entre dos cuerpos sucesivos serán: ${}_{k-1}{}^k E$, ${}_{k-1}{}^l E$, ${}_{k-1}{}^m E$, por cada efecto; y el efecto combinado será:

$${}_{k-1}{}^k E = {}_{k-1}{}^l E + {}_{k-1}{}^m E \quad (S.10)$$

produciendo rotaciones y traslaciones. A su vez, los efectos del **cuerpo 1** ($k=1$) pueden estar referidos a un cuerpo dominante (por ejemplo los errores de escala axial en un carro de torno serán debidos principalmente a la sensibilidad térmica de la bancada) o **cuerpo 0** ($k=1$). Y en otras ocasiones el cuerpo dominante será el propio **cuerpo k** (deformaciones en el carro, por efectos de la fuerza que soporta la herramienta; la fuerza a su vez se transmite al carro pero no deforma la bancada, o es de segundo orden).

Propagación de errores totales.

Aunque Soons no lo menciona, es de suponer entonces que los errores estáticos y cuasiestáticos tienen propiedades aditivas, ya que la dilatación térmica producirá un efecto aditivo a los errores de escala, o errores de cabeceo serán incrementados o compensados por torsiones de origen térmico. Con estas consideraciones deducimos la ecuación S.11, que resume los efectos de distorsiones estáticas y cuasiestáticas

$${}_{k-1}{}^k \Delta u_k = {}_{k-1}{}^k T_k (I + {}_{k-1}{}^k \delta T_k + {}_{k-1}{}^k E_k) \quad (S.11)$$

Determinación de errores fuente estáticos.

Soons propone los procesos de calibración directa [5], es decir por algún procedimiento clásico de láser, de autocolimadores, de niveles, patrones de rectitud o a pasos, alineados cerca de escalas

Los modelos de estos errores fuente que él propone son llamados piezas maestras (traducción nuestra de *piecewise polynomials*), consistiendo éstas en los llamados polinomios truncados o "s", definidos como

$$\bullet u_s = u \quad \text{if } u > 0 \quad \bullet u_s = 0 \quad \text{if } u \leq 0 \quad (S.12)$$

y para representar una función de error E con k nodos t_1, \dots, t_k y un polinomio con $k+1$ piezas para una variable independiente q , puede ser escrita

$$E(q) = \sum_{j=0}^k \beta_j q^j + \sum_{i=1}^k \sum_{j=0}^i \beta_{ij} (q-t_i)^j \quad (S.13)$$

Determinación de errores fuente cuasiestáticos.

Determinación de errores fuente cuasiestáticos.

En este tipo de errores Soons sólo comenta que pueden utilizarse modelaciones por elemento finito (FEM), los cuales permiten predecir deformaciones por efectos elásticos (stiffness) y térmicos, en la predicción de estos segundos recurriendo al empleo de sensores en el seno de las estructuras, o si la variación de temperatura es lenta y homogénea, con un solo sensor y con el modelado correspondiente por elemento finito. En cuanto a la predicción de errores por ensamble solo comenta que las transformaciones sobresalientes entre dos ensambles pueden estar referidas a un elemento dominante, sin hacer mayor comentario.

Ventajas principales del modelo de Soons, que los convierten en estándar:

La álgebra de propagación de errores de Soons parece de validez universal, en el sentido de que se pueden construir cadenas paralelas de objetos rígidos y determinar las relaciones de error entre cualquier par de objetos ya sea localizados en la misma rama o localizados en ramas diferentes; es posible inclusive añadir una tercera rama y relacionarla con la estructura de referencia "0" para establecer los desplazamientos actuales siguiendo la misma metodología. En los aspectos de errores cuasiestáticos y que para generalizar podemos llamar dinámicos, incluye los términos S.10, S.11, en que caben todos ellos, ya sean de efectos térmicos, elásticos, viscosos o de backlash.

3.3 EVALUACIÓN Y CRÍTICA DE MODELOS DE PROPAGACIÓN.

Limitaciones en la modelación de errores fuente. Quedó dicho que para fines de propagación es necesario establecer modelos a fin de interpolar la forma de guías, y de ello deducir el estado de objetos cinemáticos soportados, pero en la práctica de las verificaciones, es sabido que la deformación de una guía obtenida de calibraciones sucesivas no coincide, y que el reporte de una calibración mas bien contiene las deformaciones promedio con una banda de tolerancia como la representada en la figura 3.13.

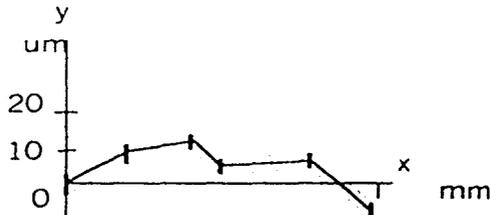


Figura 3.13. Una carta de calibración de rectitud de una guía es un valor promedio con bandas de tolerancia.

Por una análisis estadístico puede deducirse que para poblaciones pequeñas de calibraciones, los segmentos promedio pueden desviarse e inclusive salirse de las bandas si no se emplean criterios de filtrado. Si estas formas ya filtradas se consideran buenas referencias de interpolación, habrá de todas maneras el problema de calcular la inclinación para la intersección de dos segmentos. Este problema puede identificarse como **de modelo no derivable**

Para el caso de la representación de guías por polinomios ortonormales ó de la forma:

$$\Delta y(x) = A_0 + A_1 x + A_2 x^2 + \dots \quad (3.3)$$

estos son poco flexibles para representar altas concavidades del lado izquierdo y bajas concavidades del derecho, pues al aumentar el grado del polinomio, los términos de alto grado son muy poco sensibles para valores bajos, y muy sensibles a altos valores. El empleo de estos polinomios trae consigo la deformación de regiones locales normalmente a la derecha del segmento a modelar

Para el caso de piezas maestras o piecewises, elegidas por Soons, podemos decir por el momento que se asemejan a los β -splines empleados en la geometría computacional, y Soons los emplea como segmentos locales, de los que la figura 3.14 son una representación

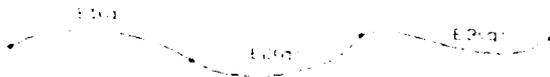


Figura 3.14. Representación de las piezas maestras recomendadas por Soons para representar defectos locales por funciones continuas y derivables, y de ser necesario derivables también en las intersecciones

En la posibilidad de definirlos por un proceso de calibración directa, estos parecen ser la solución de modelado de errores fuente, pero como se verá en posterior análisis, resulta prácticamente imposible determinar los $k + n$ términos β_i de las piezas maestras por procesos inversos

Además de las deformaciones de rectitud de guías, es necesario modelar error de ortogonalidad entre pares de cuerpos cinemáticos, errores de escala, y errores de cabeceo, tal como lo se prevé en las ecuaciones S 8 y S 9. Desde este punto de vista, los modelos de Soons no requieren que sean derivables, y las piezas maestras son un recurso demasiado fino que estará justificado en la medida que su obtención sea posible y más simple que otros modelos

Limitaciones de las funciones de propagación Para esta análisis agruparemos dos categorías

- a) **Propagación con modelos dependientes del estado de posiciones.** Este modelo que toma en cuenta la forma actual de una guía o escala respecto a un sistema universal x , y ó x, y, z tiene el inconveniente de tener que evaluar los polinomios

de interpolación para cada posición de todos los elementos guía soportados, pero en la posibilidad de hacerlo, la solución de posición de móviles es exacta. Dentro de esta categoría tenemos dos sub-categorías a1) aquellos con patines acoplados perfectamente como en el caso del ejemplo de ensambles con mínimas restricciones, y a2) aquellos donde el estado de los móviles soportados se puede aproximar por una idealización, por ejemplo la normal a la tangente de guía en el punto medio de la región de contacto, para cojinetes neumáticos. Para toda esta categoría, los errores de rectitud y de cabeceo son dependientes. En cualquiera de estos dos casos, la determinación de la forma de una guía, se vuelve un problema de álgebra no lineal, con demasiadas funciones anidadas, para ser resuelto por cinemática inversa por pruebas simples en el seno del volumen de medición. No se ha encontrado en la literatura técnica un planteamiento resuelto de los sistemas algebraicos resultantes.

b) **Propagación con modelos independientes del estado de posiciones.** Dentro de este modelo podemos también distinguir dos categorías

b1) Aquellos que consideran que los modelos descriptivos de cada error permanecen constantes pero son referidos a sistemas absolutos. Entran en esta categoría los que admiten las ecuaciones de propagación S_6 a S_9 de Soons o similares {Existen otros autores que emplean modelos muy semejantes a Soons}. Este Modelo es válido para condiciones donde es posible suponer que los errores permanecen constantes y son de segundo orden respecto a los desplazamientos totales, de lo contrario no serían aplicables las ecuaciones de propagación si al mudar de posición un elemento cinemático, sus errores se modificaran, sin embargo, la proyección de un error de rectitud en un sistema de referencia absoluto, de un elemento soportado, variara para grandes giros o cabeceos, y desde este punto de vista no son exactas las ecuaciones de propagación S_6 a S_9 .

Dos son las críticas que tenemos de este modelo considerado universal b1.1) El modelo Soons no está planteado para determinar las 21 fuentes de error por procesos inversos a partir de pruebas simples en el seno del volumen de fabricación, lo cual demandaría un proceso de calibración indirecta, y dependiendo del proceso, una cadena larguísima de ecuaciones anidadas por resolver ($k \times n$ términos β_k de las piezas maestras) y b1.2) para la determinación de los fenómenos dinámicos, los términos ${}_{i-1}E_i, {}_{i-1}E_i, {}_{i-1}E_i, {}_{i-1}E_i$, son sólo los valores actuales de fenómenos térmicos, inerciales, y de ensamble para una posición, un modo de operación, y un estado dependiente de los estados anteriores, pero no está resuelto ni propuesto el modo de actualización de cada uno de esos ${}_{i-1}E_i, {}_{i-1}E_i, {}_{i-1}E_i, {}_{i-1}E_i$ valores, al momentaneo de la medición o condición de corte. Podemos decir entonces que el modelo general está incompleto; y dada su irreversibilidad no es verdaderamente universal, y no es aplicable a los propósitos de ésta tesis.

b2) Propagación con modelos de geometría computacional, donde los modelos (ecuaciones) descriptivos de errores estáticos no son dependientes de las

posiciones, y admiten grandes variaciones incluyendo la representación de mecanismos no lineales. Pertenecen a esta categoría los modelos basados en primitivas de la geometría computacional, invariantes de la posición, los cuales además admiten modelado paramétrico ligado a fenómenos dinámicos. Se menciona esta categoría como aportación principal de esta tesis, y como alternativa viable, diferenciando las equivalencias con máquinas virtuales para CAM idealizadas y mencionadas en el capítulo primero; principalmente para las pruebas de diagnóstico. Por su importancia se dedicará el capítulo siguiente al análisis de esta alternativa.

CAPITULO IV

ALTERNATIVAS DE MODELADO, ESPACIOS A RELACIONAR. MODELACIÓN LINEAL, MODELACIÓN NO LINEAL. MODELADO POR PRIMITIVAS DE GEOMETRÍA COMPUTACIONAL E INSTRUMENTACION VIRTUAL.

4.1 ALTERNATIVAS DE MODELADO

4.1.0 INTRODUCCION.

En el capítulo primero se expuso el arribo de instrumentos virtuales como coincidente con los modelos de primitivas y códigos de corte de control numérico computarizado ó CNC, por lo que puede identificarse al recurso virtual como los recursos computacionales que ayudan los procesos CAM, incluyendo primitivas de diseño, sólidos constituyentes de máquinas, polinomios o rutinas de diseño y seguimiento de trayectorias de corte, etc , llegando actualmente a integrar estos en sistemas expertos. El análisis y diagnóstico sin embargo, plantean nuevos problemas, algunos ya discutidos en el capítulo III, y ofrecen nuevos cuestionamientos como ¿cual es el proposito del diagnostico?, ¿cual es el limite deseable de exactitud en la modelacion de partes y en los fenomenos dinamicos?, ¿con qué recursos se cuenta en nuestro contexto para diagnosticar?

A las cuestiones anteriores podemos contestar, que dentro de los propósitos de diagnóstico importantes podemos enumerar los siguientes

- para propósitos de corrección y mantenimiento de partes,
- para propósitos de mejora de procesos,
- para propósitos de corrección de diseños a fin de cancelar errores predecibles

Y la instrumentación virtual como herramienta nos puede ofrecer además posibilidades para

- elección de pruebas que revelen defectos ocultos difíciles de descubrir,
- descubrir combinaciones de errores que producen los mismos efectos,
- auxilio en las tareas de normalización de pruebas a organismos oficiales y privados,
- auxilio en el diseño de maquinas (lo cual requeriria de un modelado más profundo),
- auxilio en las tareas de enseñanza de fenómenos finos en procesos de diseño y fabricación

En este capítulo por lo tanto abordaremos los temas de modelación yendo de la simplicidad a la complejidad, atendiendo y valorando todas las cuestiones de importancia mencionadas

Como ya se asentó, una de las intenciones del diagnóstico está dirigida a la evaluación de incertidumbres o errores totales de piezas fabricadas, ya sea para estimar lo que se espera de las máquinas, ya sea para fijar en el diseño condiciones de tolerancia; para lo cual son suficientes las funciones de propagación de incertidumbre expuestas en el capítulo III.

4.1.1 ESPACIOS A CORRELACIONAR

Espacio articular y espacio operacional

Una segunda intención del diagnóstico es para prever errores sistemáticos sobresalientes, y analizar la posibilidad de cancelación desde diseño, o desde la generación de trayectorias de corte corregidas por software. Para este segundo caso, se tiene un problema más simple que el del establecimiento de funciones originales de error y de propagación al seno de máquinas, para simplemente establecer una función de correlación. Diferenciando los valores de diseño de los valores finales de fabricación, o los valores medidos de los valores patrón en un proceso de calibración, podemos identificar tal información como perteneciente al **espacio articular** y el **espacio operacional**, empleados en robótica.

Espacio articular es el dominio al que pertenecen las variables de control, pudiendo ser estas las posiciones de manivelas actuadoras de desplazamientos, posiciones de servomotores, lecturas de consolas acopladas a servomotores o a codificadores de longitud, información de fenómenos ópticos o de video, o cualquier otra información indirecta que tenga una equivalencia a las posiciones reales en el espacio de fabricación o medición. La dimensión de estas variables es diferente que longitud, aunque se puedan establecer funciones de conversión. Las variables del espacio articular tendrán a su vez una imagen en el contradominio llamado espacio operacional.

Espacio operacional. Este espacio que está en R^1 podrá tener más de tres variables, como el caso de máquinas de cuatro o cinco ejes. En él obtenemos realmente los desplazamientos o giros que produce la máquina, y que podemos determinar por un proceso de calibración con patrones físicos. A su vez en los procesos de calibración podremos emplear correlaciones de R^2 en R^3 .

4.1.2 MODELACIÓN LINEAL.

Reduciendo el problema a máquinas ortogonales de tres ejes, la correlación más sencilla entre lecturas y datos patrón (de los espacios articular y operacional respectivamente), se puede establecer por un proceso de correlación lineal.

$$\begin{aligned}
 x &= Au + Bv + Cw + D \\
 y &= Eu + Fv + Gw + H \\
 z &= Ju + Kv + Lw + I
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

Donde: u, v, w son las medidas o variables del espacio articular, y x, y, z son los valores patrón del espacio operacional

En este caso, aparentemente tenemos una matriz de rotación y una matriz de traslación, muy frecuentes en el cálculo de transformaciones geométricas; pero en el caso de una calibración o mapeo de errores, no tenemos una matriz de rotación, aunque la pudiéramos anidar. Expresando nuestras ecuaciones en álgebra matricial tenemos

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ 1 \end{bmatrix}
 \tag{4.2}$$

ó

$$X = MU
 \tag{4.2}$$

ó

$$\begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u & v & w & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T
 \tag{4.3}$$

ó

$$X^T = U^T M^T
 \tag{4.3}$$

Donde la sub-matriz que va de m_{11} a m_{33} contiene la información de variaciones de escala, ortogonalidad, y giro de los respectivos sistemas, y la que va de m_{14} a m_{34} contiene la información de traslación

La calibración lineal o de primer orden de la máquina de tres ejes es entonces M , y permitirá reversibilidad si se puede obtener M^{-1} , la conversión inversa

Primera conclusión: Es importante señalar entonces que para obtener las funciones de correlación lineal entre espacios, no es necesario conocer detalles de ensamble o determinar las funciones de propagación de errores particulares

Interpretación de la correlación.

La correlación de valores sin embargo, no permite diferenciar la contribución de errores de escala de los de ortogonalidad, o inmunizar el proceso de los desalineamientos de patrones dentro del espacio operacional

Es más, dependiendo de los procesos de solución empleados para resolver la ecuación matricial 4.3, podemos obtener las soluciones que corresponden a las figuras 4.1 a 4.3.



Figura 4.1. Un proceso de mejor correlación por mínimos cuadrados sin restricciones, reduciría todas las diferencias entre el cubo patrón y el cubo de medidas.

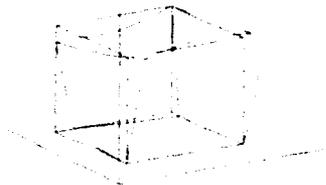


Figura 4.2. Un proceso de correlación con restricciones, donde la diferencia de alturas z de valores patrón y valores lectura, en el límite inferior se minimizan.



Figura 4.3. El significado de la correlación, también puede representar no solo la comparación de datos, sino la deformación de los ejes y escalas reales (espacio operacional) respecto a los valores tomados como patrón, también del espacio operacional

Como se expresó en el tema de modelación de guías, dos calibraciones sucesivas no proveen información útil, sino sólo las poblaciones. La calibración lineal de una máquina, requerirá entonces de la solución de sistemas sobre determinados por mínimos cuadrados, donde X^T y U^T serán matrices columna de bastante más renglones que 4.

Solución lineal de alta exactitud por Factorizaciones.

Sin embargo la solución por mínimos cuadrados, mutilará la información fina de las mediciones, si se emplea aritmética de simple precisión. Un método alternativo de solución de sistemas sobredeterminados, consiste en la factorización SVD (de Singular Value Decomposition en inglés) [7].

Esta factorización consiste en que una matriz columna (A) puede factorizarse en :

$$(A) = (U)(W)(V)^T \quad (4.4)$$

En nuestro caso podemos renombrar los términos de la ecuación 4.3 para expresarlos como:

$$B = AY \quad (4.5)$$

$$\text{En vez de} \quad X^T = U^T M^T \quad (4.3)$$

donde Y equivale a M^T , o matriz de correlación,

A y B son las matrices dato de los espacios articular y operacional respectivamente.

$$\text{La solución de } Y \text{ es} \quad Y = U^T W^{-1} B \quad (4.6)$$

La ventaja de este método consiste en que no se producen sumatorias de términos al cuadrado (que si se obtienen en correlaciones por mínimos cuadrados), que mutilan cifras sub-decimales, afectando la exactitud de la solución

Para los casos de solución particulares, donde se hace coincidir algún eje o plano de la información articular con la operacional (ver figura 4.2), se requiere la separación de los términos rotación anidados en M

M puede factorizarse para distinguir los términos de rotación R , que puede revelar sólo la indicación de un desalineamiento de valores patrón, producto de una práctica defectuosa o incompleta de calibración (por ejemplo no se alineó previamente el patrón, ni mecánicamente ni numericamente), o la propiedad del patrón de no tener los elementos internos propios en tolerancia (es decir los valores patrón requieren corrección). Algebraicamente M se podrá expresar como

$$M = \begin{bmatrix} K & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ ó } M = \begin{bmatrix} QS & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

donde Q contiene elementos sólo de rotación y S contiene los elementos de escalamiento y ortogonalidad [Numerical Recipes in C][7]. En esta factorización sin embargo, los elementos de escalamiento y ortogonalidad no son explícitos y se tienen que obtener por un proceso indirecto, y T no corresponde al desplazamiento de los límites, sino al desplazamiento medio

Finalmente, la norma cuadrada de la diferencia $X-MU$ nos reportaría la bondad de la correlación, también reportaría la magnitud de errores no lineales, estos últimos nos permitirían elegir valores máximos de componentes no lineales en una segunda etapa de calibración

4.1.3 Modulación no lineal con recursos lineales.

Se puede demostrar que la bondad de la correlación lineal mejora al escoger espacios de correlación más pequeños, y el equivalente en la calibración directa son las cartas de calibración, cuando aun no se aplican funciones de interpolación. El equivalente en el espacio 3D es establecer tantas funciones de correlación 3D, como la tolerancia lo requiera, estableciendo los límites de validez de esa función. Su representación puede ser la de la figura 4.7, con retículos delimitadores de fronteras y retículos de error mapeados en los primeros. Carl Zeiss emplea este proceso



Figura 4.4. Cubo segmentado, edición de segmentos, y correlación lineal de medidas y valores absolutos dentro de cada segmento.

4.1.4 Modelación no lineal.

A fin de correlacionar valores de espacios articular y operacional directamente, sin incluir cinemática de cuerpos rígidos, las funciones no lineales del tipo

$$\begin{aligned}
 u &= A_u + B_u x + C_u y + D_u z + E_u x^2 + F_u y^2 + G_u z^2 + H_u xy + I_u yz + J_u xz + \dots \\
 v &= A_v + B_v x + C_v y + D_v z + E_v x^2 + F_v y^2 + G_v z^2 + H_v xy + I_v yz + J_v xz + \dots \quad (4.8) \\
 w &= A_w + B_w x + C_w y + D_w z + E_w x^2 + F_w y^2 + G_w z^2 + H_w xy + I_w yz + J_w xz + \dots
 \end{aligned}$$

o funciones inversas del mismo tipo, u otras de tipo racional, o de Fourier, etc., permiten establecer las correlaciones directas. Su solución empero requieren de la explotación de un principio de calibración como pueden ser las posiciones conocidas de patrones o su invariabilidad de tamaño. Pero los principios de invariabilidad de tamaño de calibres requiere de del anidamiento de las funciones de calibración en la propiedad geométrica a explotar, en este caso de tamaño. En el mejor de los casos si estas se pueden obtener, aún estamos lejos de deducir errores fuente no lineales pues los aspectos de ensamble han quedado fuera.

Retomando los propósitos y principios mencionados, es necesario volver a preguntarse si los términos de alto grado perfeccionan el proceso o empeoran la calidad de las correlaciones.

4.2 MODELACIÓN CON ELEMENTOS DE GEOMETRÍA COMPUTACIONAL

La representación de elementos geométricos por el álgebra no siempre coinciden con la representación y manejo de sistemas de geometría computacional, así, mientras que una recta en un espacio 2D se define algebraicamente por una ecuación $y = mx + b$, en geometría computacional se define por dos puntos (x_1, y_1) , (x_2, y_2) . Por ejemplo, una recta inclinada 45 grados y que cruza el eje de las ordenadas en 3 se escribe $y = 7571x + 3$, y en geometría computacional se representa por $(0, 3)$, $(1, 4)$. Para este capítulo se consideraron los principios básicos de la geometría computacional expuestos en la referencia [8].

Una rotación de 45 grados del mismo elemento alrededor de la intersección, se representaría por $y = x + 3$, con la imposibilidad de representar numéricamente la pendiente, y en geometría computacional se representaría por $(0, 3)$, $(0, 4)$. Es conveniente anotar que mientras que el giro de un arreglo de puntos alrededor de otro puede obtenerse por la simple aplicación de transformaciones geométricas lineales, los valores de pendientes sólo pueden obtenerse funciones de tipo trigonométrico.

Adicionalmente, las necesidades de representación de elementos geométricos en diseño, requieren de modelos acotados y ocasionalmente con propiedades vectoriales $(0, 3)$, $(1, 4)$ = $-[(1, 4), (0, 3)]$, y muy escasamente de modelos de extensión infinita, (recta).

La representación de una recta eu 3D sería respectivamente:

Algebraicamente	Por geometría computacional:
<p>Una familia de pares de ecuaciones plano:</p> $A_1x + B_1y + C_1z + D_1 = 0$ $A_2x + B_2y + C_2z + D_2 = 0$ <p>que se intersectan en dicha recta</p>	<p>(0, 3, 1), (1, 4, 5)</p>

Un resumen de elementos geométricos representados sería:

Representación algebraica:	Representación por Geometría computacional
<p>Círculo en plano x, y: $(x - xc)^2 + (y - yc)^2 - r^2 = 0$</p> <p>Círculo plano en el espacio: Una familia de pares de ecuaciones cilindro y plano: $A_1x + B_1y + C_1z + Ex^2 + Ey^2 + Gz^2 + D_1 = 0$ $A_2x + B_2y + C_2z + D_2 = 0$ Cuya intersección es un círculo plano</p>	<p>Circ2D: (xc, yc, r)</p> <p>Circ3D: (yc, zc, r, a, b, c)</p> <p>Donde a, b, c son los cosenos directores de la normal al plano de ese círculo, r es el radio</p>
<p>Hélice de paso constante</p> <p>La intersección de una superficie espiral, que probablemente no se pueda representar por una función, y un cilindro</p>	<p>Hélice: (xc, yc, zc, r, a, b, c, p, d)</p> <p>Que se representaría por el centro de una espira, las direcciones normales de su eje, el paso, y adicionalmente la dirección de giro (CW o CCW)</p>
<p>Cubo (paralelepípedo)</p> <p>Seis superficies, seis ecuaciones. Implica transformaciones de escala, rotación y traslación muy complejas y ocasionalmente información de intersecciones</p>	<p>Cubo:</p> <p>Un punto origen, largo, ancho, alto. Adicionalmente dirección de arista principal y giro alrededor de esa arista</p> <p>Implica transformaciones de escala y rotación por la aplicación de [M]</p>
<p>Superficie esculpida: No existen funciones explícitas para todas las superficies esculpidas, y ordinariamente no se pueden transformar</p>	<p>Superficies B-Spline Editables, ordinariamente se pueden transformar por la simple aplicación de [M].</p>

Los elementos de geometría computacional poseen además otras propiedades como son: formación de arreglos, color, representación discontinua, capacidad de ocultamiento, sombreado, representación en perspectiva, escalamiento, posibilidades de operaciones booleanas como A-B, B-A, A∩B, A∪B, posibilidades de relaciones geométricas como simetría, centro de gravedad, momentos de inercia, y sobre todo información exacta dentro de catorce cifras subdecimales.

Dadas estas opciones de manejo por medio de elementos de geometría computacional, estos elementos se vuelven idóneos para representar tanto sólidos representativos de cuerpos rígidos o flexibles constituyentes del instrumento, como errores de los mismos. Así, es posible representar los siguientes errores:

Error a representar:	Elementos de geométrica computacional:
Escalas y errores de escala	Alambres 3D con trazos de distribución conocida
Guías deformes: rectitud, cabeceo, ensamble no ortogonal	b-Splines, b-Splines ensamblados y arreglados (en arrays)
Backlash	Sólidos acoplados que no respetan principios de mínimas restricciones, recargados en diferentes posiciones

Dentro del catálogo de elementos geométricos útiles en geometría computacional resaltan el alambre 3D y la superficie 3D llamada 3D-Mesh. Ya que estos son los elementos clave para representar errores de forma y escala, además de proveer información para definir ensambles, el resto del análisis se enfocará sobre ellos y se considerarán los demás elementos (cubo, esfera, cuña, domo, cilindro, etc.), como complementarios para el formado (embodiment) de máquinas. Estos segundos a su vez bastante familiares para los diseñadores con experiencia en CAD.

El alambre 3D

Para la representación de un *Plane* (2D), y *3D-Poly* (de autocad 10), el polinomio paramétrico es

$$p = UV \quad (4.9)$$

donde:

p es la matriz columna de n puntos x, y en el plano, ó x, y, z en el espacio.

u es la matriz $n \times 4$ de coeficientes paramétricos:

$$U = [(1-u) \quad 3u(1-u)^2 \quad 3u^2(1-u) \quad u^3] \quad (4.10)$$

V es la matriz columna de 4 x 2 elementos vértices en el plano, o de 4 x 3 elementos en el espacio que moldean el alambre.

Este alambre nos permite representar error de guías planas, proyección de guías y/o distribución de escalas. Ver figura 4.5

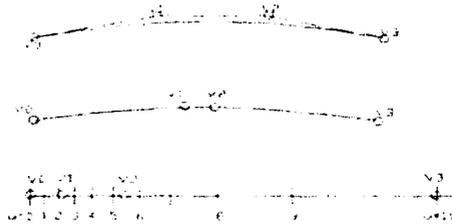


Figura 4.5. Representación de forma y distribución escalar por b-splines.

Y la representación de superficies 3D-Mesh es un polinomio de Bezier:

$$p = uVw \quad (4.11)$$

donde: p es la matriz columna de n puntos x, y, z en el espacio.

u es la matriz $n \times 4$ de coeficientes paramétricos (4.10).

V es la matriz 4×4 elementos de vértices o puntos de control x, y, z en el espacio, que moldean la superficie.

w es la matriz $4 \times n$ de coeficientes paramétricos

$$W = [(1-w) \quad 3w(1-w)^2 \quad 3w^2(1-w) \quad w^3]^n \quad (4.12)$$

y su representación geométrica se muestra en la figura 4.6

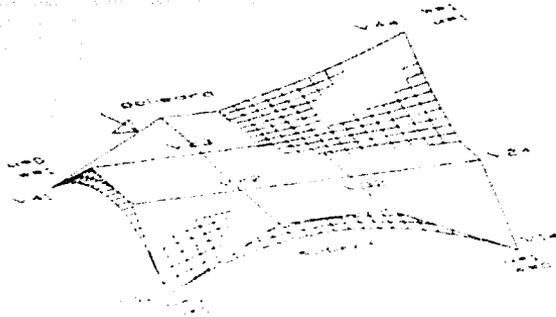


Fig. 4.6. El modelo de 3D Mesh es una superficie Bezier grado tres que permite moldearse con alta exactitud a cualquier segmento continuamente variable, con posibilidad de recurrir a la edición con continuidad si la exactitud lo requiere.

Las posibilidades de representación de máquinas deformes es muy vasta, y se ejemplificará en algunas máquinas mostradas en el capítulo II, en donde tales fueron representadas con elementos idealizados o "perfectos". Ver figuras 4.7, a 4.9

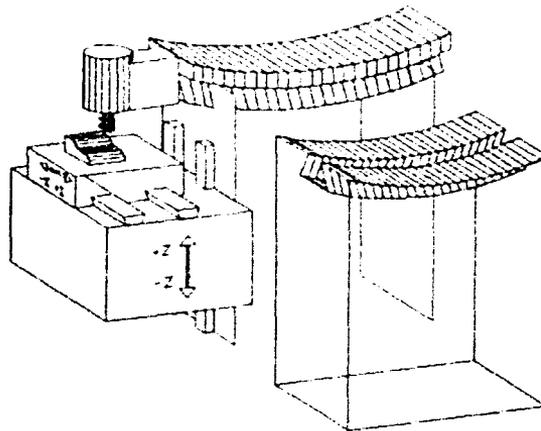


Figura 4.7 Representación partes de ensamble de una fresadora de tres ejes, donde las gulas del recorrido Y poseen un error de rectitud en el plano Y-Z.

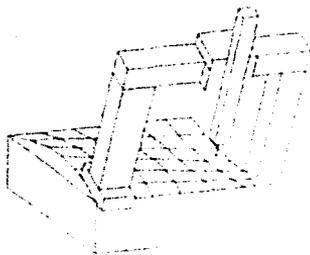


Figura 4.8. Ensamble de cuerpos rígidos deformes, soportados, en que se incluyen defectos de cabeceo.

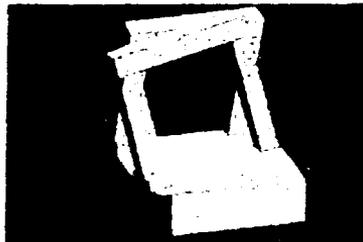


Figura 4.9 Ensamble de cuerpos rígidos deformes, soportados, en que se incluyen efectos de cabeceo, representados en una interface del Centro de Instrumentos UNAM

4.3 CONCEPTO DE INSTRUMENTO VIRTUAL.

Finalmente dadas las bondades primitivas básicas de geometría computacional, para los propósitos de esta tesis, se define como **INSTRUMENTO VIRTUAL** al conjunto de elementos geométricos computacionales, a sus modelos paramétricos, a las herramientas de transformación geométrica y numérica internos en ambientes CAD, a herramientas externas desarrolladas por programación, que se enfoquen al diagnóstico, corrección o predicción de comportamiento, de máquinas de fabricar o máquinas de medir.

4.4 CONCLUSIONES DE MODELADO. se pueden resumirse en los siguientes

- Primera:** Para fines de correlación directa lineal repetible entre valores de medidas o de diseño (articular) y valores patron (operacional), no es necesario conocer los errores fuente, condiciones de ensamble, ni definir ecuaciones de propagación de errores fuente
- Segunda:** Es posible aproximarse a errores fuente por factorización de M y por procesamiento de datos con M
- Tercera:** Para fines de correlación no lineal repetible, es posible establecer correlaciones lineales aplicadas por intervalos

Cuarta: Los elementos *Plane*, *3D-Poly*, *3D-Mesh*, que algebraicamente son polinomios paramétricos de Bezier, son los adecuados para representar errores de escala, y las superficies de ensamble de máquinas deformes

Resta finalmente analizar y probar los elementos aquí descritos, como constituyentes de instrumentos y como modelos representativos de errores, para establecer criterios generales de diagnóstico, operación y corrección de máquinas y procesos

CAPITULO V

EMPLEO DE RECURSOS DE INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL AL ESTUDIOS DE CASOS PROBABLES Y CASOS CONCRETOS.

CONSIDERACIONES GENERALES.

EMPLEO DE CORRELACIONES LINEALES.

EMPLEO DE CORRELACIONES NO LINEALES.

ANÁLISIS DE HISTERESIS.

INTEGRACIÓN DE RECURSOS AL ESTUDIO DE CASO: FRESADORA 3D Y PLACA DE VIDRIO.

5.1 CONSIDERACIONES GENERALES

Como se describió en la parte final del capítulo anterior, la combinación de defectos contribuyentes a un resultado final en objetos es muy vasta, y depende entre otras cosas de las configuraciones de máquinas. En este capítulo se presentarán casos reales y potencialmente reales de máquinas, a los que se aplicarán herramientas de simples a complejas, y de correlación, a diagnóstico y predicción. Los criterios de elección de casos no corresponde a todos los casos ni a los más frecuentes, sino a aquellos que se consideran más genéricos, y que se estima finalmente pueden constituir las bases datos de un sistema experto para manejo de exactitud en máquinas. La metodología de análisis es particular de cada caso, y por eso se les considera genéricos, sin embargo tiende a integrar las bondades probadas, para constituir un sistema experto de exactitud de máquinas.

El plan de presentación de temas que se estima logra los objetivos de generalidad y complementariedad es el siguiente:

- Establecimiento de hipótesis básicas
- Análisis lineal en placa virtual
- Análisis lineal segmentado de placa virtual
- Análisis no lineal con independencia cinemática
- Análisis no lineal con dependencia cinemática
- Análisis de casos 2D y 3D
- Aproximaciones lineales a casos de histéresis
- Estudio de caso concreto de placa de vidrio en fresadora 3D.

5.1.1 HIPÓTESIS BÁSICAS

Para el análisis de estas máquinas se partirá de las hipótesis:

Hipótesis A: La forma de las piezas es perfecta y las deformaciones reportadas en las medidas son atribuibles a errores en el instrumento de medición. Hipótesis válida para el caso de diagnóstico de máquinas de medición.

Hipótesis B: La forma de las piezas es defectuosa, y se puede conocer perfectamente por medio de medición en máquinas de coordenadas (MMC's) perfectas, o por procedimientos absolutos que garantizan positivamente propiedades de forma dentro de tolerancias. Esta hipótesis es válida para diagnosticar máquinas de fabricar.

Hipótesis C: La forma y tamaño de piezas es invariante, independientemente de su localización u orientación dentro del volumen de medición o de fabricación. Para aplicaciones de diagnóstico de máquinas de medir (autocalibración), las medidas deberán satisfacer condiciones de forma, mediante manipulaciones algebraicas.

Hipótesis D: Para los objetivos de predicción de comportamiento, corrección de medidas o trayectorias, o corrección de errores fuente, es intrascendente la distinción exacta de cada error contribuyente, y sólo importa que la correlación de entradas y salidas sea satisfecha por una combinación de errores fuente e intermedios, acoplados en las cadenas cinemáticas posibles y probables.

5.5.1.1 Discusión de hipótesis

La hipótesis A es el supuesto básico para calibrar máquinas de medir por coordenadas, y a partir de ellas conocer y calificar otros procesos.

La hipótesis B, presupone que existen recursos seguros para conocer las deformidades de las piezas de fabricación, aunque no las causas de sus deformidades.

La hipótesis C se ha mencionado para dar generalidad a este documento; pero los sistemas algebraicos involucrados no son completamente públicos y exceden los propósitos de simplicidad de esta tesis.

La hipótesis D se enuncia para aclarar de una vez por todas que los errores fuente no se pueden determinar sin incertidumbre por procesos de calibración indirectos, pero es necesario tomar en cuenta que un error puede llegar a ser suprimido por otro error. En los procesos que se emplearán, esto es perfectamente posible, y se ejemplifica con la calibración lineal y su modelo algebraico siguiente:

$$M = \begin{bmatrix} QS & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q'S' & T' \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Donde es posible asociar más de una combinación de errores de ortogonalidad y escala a un sistema de medición o fabricación.

Pero finalmente, el sistema puede ser corregido por cualquier recurso: *QS* ó *Q'S'*. En aplicaciones de más elementos de calibración estas posibilidades se incrementan.

5.2 EMPLEO DE CORRELACIONES LINEALES.

5.2.1 Análisis lineal en placa virtual.

Se maquina una placa con orificios arreglados en forma reticular ortogonal con paso de 50 mm., en un dispositivo CAD que simula los recorridos de una herramienta en una máquina, donde la placa se localizó con los cantos en el origen. La placa llega a un laboratorio para quienes el estado de la máquina es desconocido, y se pretende obtener la mayor información útil posible del arreglo. Los datos de diseño o recorrido de máquina herramienta, y de medición en máquina de medición de coordenadas son respectivamente.

Datos de diseño y código G enviado a máquina-herramienta:		Valores absolutos determinados en MMC:		Error o diferencia: $[x-u] - [x] - [u]$	
35,	2	35,	2	35,	2
200	150	100.216	63.02101	99.784	86.97899
249.9996	150	142.5371	66.96066	107.4625	83.03934
349.9999	150.0001	229.7741	78.49767	120.2259	71.50243
449.9998	149.9995	321.1334	92.09912	128.8664	57.90038
549.9996	150.0003	419.0964	104.0027	130.9032	45.9976
199.9997	200.0001	163.639	122.6827	96.36069	77.31741
200.0003	200.0003	185.8442	139.5325	114.1561	69.4678
399.9998	200.0001	272.1246	141.7857	127.8752	58.2144
499.9995	200.0005	364.3404	153.4942	135.6591	46.5061
249.9996	249.9998	142.638	177.8644	107.3616	72.13541
350.0004	250.0004	224.038	186.4378	125.9624	63.56259
449.9997	250.0004	310.7294	196.9219	139.2603	53.07849
550	250.0004	400.0256	206.5664	143.9744	43.43399
199.9999	300.0003	101.8883	221.391	98.1116	78.6093
300.0004	299.9997	178.5694	227.2953	121.431	72.70439
400.0003	300.0005	260.1311	236.0517	139.8692	63.94879
499.9998	300	348.8163	245.5566	151.1835	54.44341
549.9999	299.9995	397.2944	249.7551	152.7055	50.24442
250	349.9997	136.7125	265.393	113.2875	84.60669
350.0004	350.0003	213.4402	272.1858	136.5602	77.81451
449.9996	350.0004	296.3285	280.7689	153.6711	69.23151
549.9999	350	388.9557	289.063	161.0142	60.93701
200.0001	400	98.9728	301.4567	101.0273	95.5433
300	399.9999	171.0853	308.2063	128.9147	93.79361
400	400.0002	248.7686	313.4291	151.2314	86.57111
499.9996	399.9997	334.4489	321.5418	165.5509	78.45789
250.0002	450.0005	133.187	338.7015	116.8132	111.299
349.9996	450	206.0742	344.3331	143.9254	125.6669
449.9995	450	285.8472	351.635	164.1523	98.36499
549.9996	450.0004	376.377	358.9644	173.6226	91.03601
199.9998	499.9995	99.67395	370.0544	100.3259	129.9451
299.9998	500	169.0635	374	131.9363	126
400.0001	499.999	242.6314	380.1318	157.3667	119.8681

499.9997	498.9999	326.0662	386.5875	173.9335	112.4124
550.01	500	372.7453	390.5558	177.2548	109.4442

Tabla 5.2

Que se pueden representar geoméricamente como:

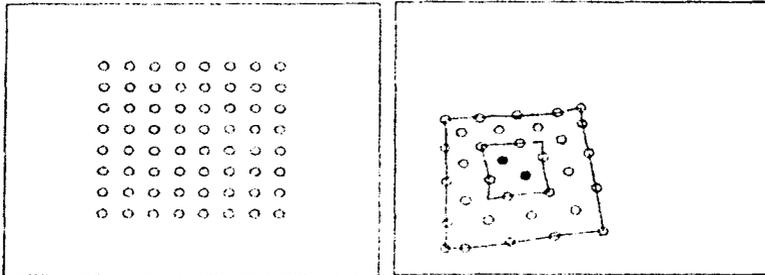


Figura 5.1. Mapeo de calibraciones de datos de diseño y de datos de fabricación de una placa en una máquina virtual.

5.2.1.1 Correlación y compensación lineales.

Tomando como datos con error los primeros y absolutos los segundos, y aumentando las tablas para obtener matrices homogéneas llamadas u , v , a los primeros y x , y , los segundos, podemos establecer la ecuación matricial

$$\begin{bmatrix} x & y & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u & v & 1 \end{bmatrix} M^T \tag{5.2}$$

Donde la primera y segunda matrices son matrices columna de 35 renglones.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \tag{5.3}$$

Con el proceso SVD (%%) se obtiene la correlación M^T :

$$M^T = \begin{bmatrix} 8399002 & 08935717 & -9.778887E-9 \\ -0.08231118E-2 & 8391083 & 3.841706E-9 \\ -46.52241 & -61.87375 & 1.000001 \end{bmatrix}$$

y la inversa:

$$M^{T1} = [M^T]^{-1}$$

será la matriz de compensación que producirá los datos U_{comp} de nuevos códigos de corte.

$$U_{comp} = UM^T \quad (5.4)$$

Aplicándolos al diseño se obtiene la segunda columna.

Datos de diseño deseados,		Datos de diseño corregidos [UCOMP] = [U] * [MTI]	
35	2	35	3
200	150	314.972	218.9572
249.9996	150	373.8976	212.6832
349.9999	150.0001	491.7201	200.1354
449.9998	149.9995	609.5519	187.5867
549.9996	150.0003	727.3839	175.0398
199.9997	200.0001	320.7509	277.9289
300.0003	200.0003	438.5838	265.3811
399.9998	200.0001	556.4153	252.833
499.9995	200.0003	674.247	240.2854
249.9996	249.9998	385.4461	330.6262
350.0004	250.0004	503.2792	318.0789
449.9997	250.0004	621.1105	305.531
550	250.0004	738.9429	292.983
199.9999	300.0003	332.3096	395.8723
300.0004	299.9997	450.1424	383.3236
400.0003	300.0005	567.9745	370.7766
499.9998	300	685.8059	358.2281
549.9999	299.9995	744.722	351.9536
250	349.9997	397.0052	448.5892
350.0004	350.0003	514.8378	436.022
449.9996	350.0004	632.6689	423.4742
549.9999	350	750.5012	410.9256
200.0001	400	343.8685	513.8151
300	399.9999	461.7005	501.2671
400	400.0002	579.5326	498.7195
499.9998	399.9997	697.3644	476.171
250.0002	450.0005	408.564	566.5134
349.9996	450	526.3954	553.9649
449.9995	450	644.2274	541.417
549.9996	450.0004	762.0596	528.8695
199.9998	499.9995	355.4267	631.7578
299.9998	500	473.2588	619.2104
400.0001	499.9999	591.0912	606.6624
499.9997	498.9999	708.8073	592.4351
550.0001	500	767.8394	587.8406
	U		X

Tabla 5.2.

Que nos producirán un corte en la maquina defectuosa que se reporta en la segunda columna, y la diferencia de posiciones reales menos teóricas o su error en la tercera.

Datos de diseño deseados		Valores absolutos de nuevo maquinado [XCOMP] = [X] * [MTI]		Diferencia entre datos deseados y maquinados con compensación lineal	
		35	2	35	2
200	150	187.3409	128.8922	-12.6591	-21.1078
249.9996	150	237.6641	128.2283	-12.33551	-21.7717
349.9999	150.0001	341.7908	130.885	-8.209106	-19.1111
449.9998	149.9995	451.0135	135.4673	1.013702	-14.5322
549.9996	150.0003	567.8213	137.2144	17.82172	-12.7859
199.9997	200.0001	198.2763	198.6296	-1.729401	-1.170502
300.0003	200.0063	296.0419	197.7728	-3.958496	-2.227509
399.9998	200.0001	399.0085	200.2188	-9.91272	.218689
499.9995	200.0003	509.0216	202.457	9.022095	2.456696
249.9996	249.9998	250.6019	259.019	.6022949	9.019211
350.0004	250.0004	347.5082	259.9168	-2.492188	8.916412
449.9997	259.0004	450.8821	260.4028	.8824158	10.4024
550	250.0004	564.2745	259.8214	14.27448	9.821014
199.9999	300.0003	207.6167	315.469	7.616806	15.46669
300.0004	299.9997	298.6541	312.8108	-1.346283	12.8111
400.0003	300.0005	395.7721	312.9041	-4.22821	12.90363
499.9998	300	501.3704	312.9863	1.370605	12.9863
549.9999	299.9995	558.9784	311.8551	8.978516	11.85559
250	349.9997	252.7368	362.9966	3.736801	12.99692
350.0004	350.0003	344.9318	361.3805	-5.068694	11.38019
449.9996	350.0004	443.5929	361.1029	-6.406708	11.10251
549.9999	350	553.7315	359.2587	3.731628	9.258698
200.0001	400	213.4357	410.2668	13.43559	10.26682
300	399.9999	298.9564	406.8201	-1.04361	6.82019
400	400.0002	391.3271	405.9912	-8.672913	5.590973
499.9998	399.9997	493.2237	404.4085	-6.776993	4.408813
250.0002	450.0005	258.056	443.9014	8.055801	-0.1009
349.9996	450	344.5915	447.3976	-5.408112	-2.602386
449.9995	450	439.4337	445.8999	-10.56583	-4.000092
549.9996	450.0004	546.954	443.2848	-3.045593	-6.715607
199.9998	499.9995	222.1908	491.0852	22.19099	-8.914307
299.9998	500	303.2317	487.1573	3.231903	-12.84271
400.0001	499.9999	391.8054	485.0126	-8.194702	-14.96732
499.9997	498.9999	490.8645	482.1773	-9.135193	-16.8226
550.02	500	546.3262	481.0004	-3.67395	-18.9996

Tabla 5.3

5.2.1.2 Bondad de la compensación

Puede observarse de la tabla 5.2 de maquinados originales, y de la tabla 5.3 maquinados corregidos, el error disminuyó de valores promedio de 134 mm. a 6 mm, o se obtuvo un nivel de mejora de 20 veces por la sola corrección lineal que produce la matriz de calibración MT a los datos de diseño. Esta sola corrección eleva en un nivel de exactitud o clase de calidad a las maquinas

5.2.1.3 Diagnóstico y corrección.

Un diagnóstico aproximado (lineal) de la máquina herramienta se puede obtener introduciendo la base de datos:

$$I I = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 500 & 0 \\ 0 & 500 \end{bmatrix}$$

Que a través de la submatriz QS^T de M^T producirá los desplazamientos $X = U(QS)^T$ aproximados:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -419.9501 & 44.67859 \\ -41.15559 & 419.5541 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 500 & 0 \\ 0 & 50 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 8399002 & 08935717 \\ -0.08231118 & 8391083 \end{bmatrix}$$

Donde los primeros dos puntos de U representan el recorrido de la máquina herramienta, reportados en su consola o en su espacio articular como sólo movimiento de "x", pero en realidad se movió a -419.9501, 44.67859, o un desplazamiento absoluto 422.32 mm. Las escalas se encuentran dilatadas y reportan una longitud de 0.84464 del recorrido.

De los primero y tercer punto se obtiene el vector de desplazamiento cuando aparentemente sólo se mueve en "y", pero se mueve en x e y una longitud 0.84135 del recorrido.

El ángulo que forman los segundo y tercer punto con el primero es de 89.5296° en el espacio absoluto operacional.

Finalmente la factorización de (QS) $(QS)^T = ((Q)(S))^T$

$$\text{Produce: } \begin{bmatrix} 8399002 & 08935717 \\ -0.08231118 & 8391083 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 0.9948137 & 0.1017135 \\ -0.1017135 & 0.9948137 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 8439165 & 003545 \\ 0035451 & 8438452 \end{bmatrix}^T$$

Y la matriz Q nos informa que la información real X estará girada $\cos^{-1}(0.9948137) = 5.8378^\circ$, lo cual corresponde al giro medio del arreglo maquinado, si se mapea en los datos de diseño (espacio articular).

Existe una familia de factorizaciones $A = QS$, donde una muy usual y bastante cercana a nuestra factorización es llamada factorización QR , donde Q es ortogonal y R es diagonal superior [7]. Estas factorizaciones se ofrecen en paquetes como Math Lab o Numerical Recipes in C [7].

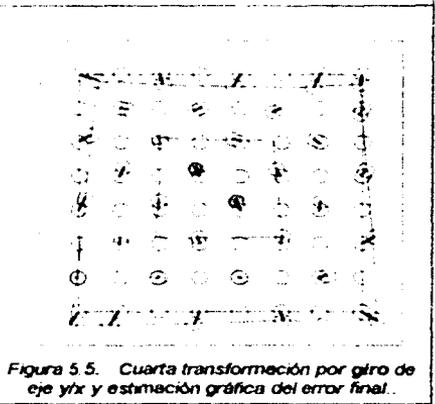
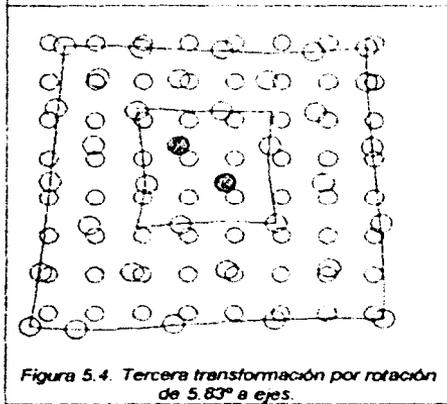
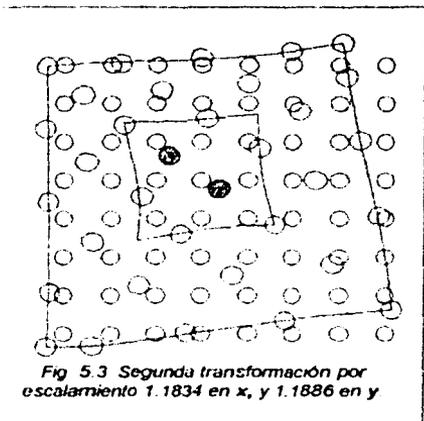
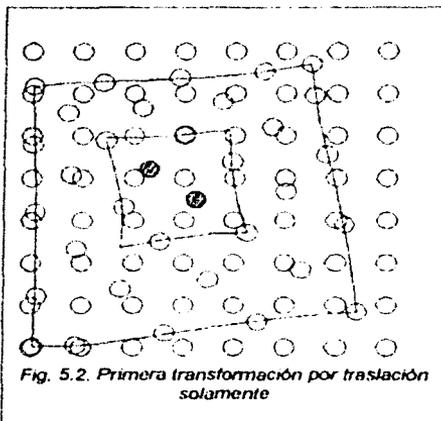
Del diagnóstico se puede establecer las siguientes correcciones.

encoger las escalas 0.84464 y 0.84135 veces de x y y respectivamente,

girar la guía y 0.4704° sobre la guía x

girar la mesa o los dispositivos de sujeción 5.8378° .

El resumen de procesos puede verse en las figuras 5.5 a 5.5 siguientes:



5.2.1.4 **Conclusión** Para fines de compensación de procesos de corte, la corrección lineal puede ser suficiente.

5.2.2 **Análisis lineal segmentado de Placa Virtual.**

Aplicando el criterio de multicorrelación segmentada expuesto en el capítulo anterior, podemos establecer las correlaciones de los puntos extremos de los cuadrantes de la placa según se muestran en la figura 5.6.

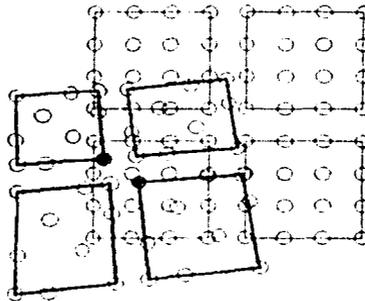


Figura. 5.6. Maquinados iniciales agrupados en cuadrantes para establecer correlaciones

Cuyos datos son

Diseño Cuadrante 1			Maquinados Cuadrante 1		
4	3		4	2	
199.9998	150.0001	1	100.2159	63.02112	1
349.9997	150.0002	1	229.7739	78.4977	1
349.9997	299.9999	1	218.6446	231.439	1
200.0004	300.0003	1	101.8887	221.391	1
<i>U</i>			<i>X</i>		
Correlación: $X=UM$			Correlación $U_{comp} = U(MT)^{-1}$		
$MT = [MIT] \cdot [U14] \cdot [X1]$			matriz invertida: $[MIT]^{-1} =$		
3	3		3	3	
.8210497	.0850817	-3.399327E-08	1.21413	-9.954251E-2	4.46501E-8
-3.151804E-2	1.037707	1.676381E-08	3.68754E-2	.9606382	-1.613432E-8
-56.06696	-108.295	1.000002	72.06613	98.45107	.9999987

Tabla 5.4.

Diseño Cuadrante II			Maquinados Cuadrante II		
4	3		4	3	
399.9999	149.9998	1	274.8364	85.25893	1
549.9998	150.0003	1	419.0966	104.0028	1
550.0003	299.9997	1	397.2947	249.7552	1
400.0002	299.9998	1	260.1311	236.0511	1

Tabla 5.5

Diseño Cuadrante III			Maquinados Cuadrante III		
4	3		4	3	
199.9995	349.9996	1	100.1427	263.1909	1
349.9994	350.0003	1	213.4398	272.1857	1
349.9999	499.9994	1	204.4589	376.8622	1
199.9996	500.0005	1	99.67384	370.055	1
Diseño cuadrante IV			Maquinados Cuadrante IV		
4	3		4	3	
400.0002	349.9998	1	253.9594	276.3679	1
549.9995	349.9999	1	388.9853	289.063	1
550.0001	500.0003	1	372.7452	390.556	1
399.9995	500.0002	1	242.631	380.1319	1

Tabla 5.6

podemos establecer cuatro matrices de correlación, y cuatro matrices de corrección de cortes, como las obtenidas en la tabla 5.4 para el cuadrante I, obteniéndose los datos corregidos de diseño de la tabla 5.7 izquierda, que producen las trayectorias de la tabla 5.7 centro

Diseño corregido cuadrante I	Maquinado corregido cuadrante I	Diferencia diseño menos corte
4	4	4
320.4242	196.0057	149.0158
502.5443	353.9373	150.9867
508.0757	346.0646	299.0158
325.9563	203.9367	300.9855
		-3.934097
		-3.937192
		-3.935089
		3.93631
		- .984314
		.986496
		-.9841003
		.985199

Tabla 5.7.

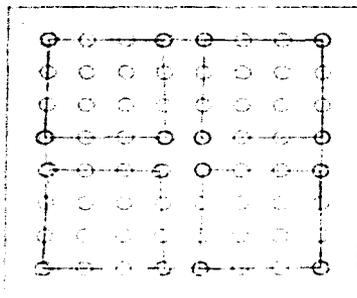


Figura 5.7. Maquinados por corrección de $M_1^{-1}, M_2^{-1}, M_3^{-1}, M_4^{-1}$

El nivel de mejora promedio con la segunda correlación es de 85 veces, con mejoras locales de 125 y 25 veces, para los mejores y peores casos (cuadrante I) respectivamente

5.2.2.1 Diagnóstico y corrección.

El diagnóstico permite establecer criterios de corrección aplicados localmente como en el caso del primer ejercicio lineal expuesto. Esto es posible y tiene clara equivalencia con máquinas gigantes que están hechas a base de ensamblajes en bancadas, escalas, tornillos sinfín, etc. o para la corrección lineal por tramos, cuando existen dispositivos para ello.

5.3 EMPLEO DE CORRELACIONES NO LINEALES

5.3.0 Análisis no lineal de Placas.

Este análisis supone dos casos como posibles a) aquellos donde existe dependencia cinemática de cuerpos con movimientos ortogonales, y b) aquellos donde no existe dependencia cinemática.

Como se mencionó en el capítulo II, el principio de alineamiento de ejes de escalas y de eje de medida llamado principio de Abbe se emplea para minimizar el efecto de cabeceo, en las medidas. En este capítulo llamaremos efectos de Abbe a los cabeceos o amplificación de defectos por cabeceo, en procesos de fabricación o de medición. Este efecto se presenta, en menor o mayor grado, y en diferentes combinaciones en los siguientes casos:

Procesos con movimientos independientes de posicionadores de herramienta u objetos, o de independencia cinemática.

Procesos con movimientos dependientes de posicionadores de herramienta u objetos, o de dependencia cinemática.

Procesos sobre objetos de grandes dimensiones; ejemplo cuando se maquina un objeto volumétrico, o se le ejecuta un corte plano paralelo a una mesa en una cara superior, sus defectos por el viaje irregular de la mesa serán mayores que cuando se maquina lo mismo en una placa.

Procesos donde los objetos o herramientas están localizados lejos de guías o correderas, pero en su prolongación

Procesos donde los objetos o herramientas están localizados lejos de guías o correderas, en dirección transversal

Un tercer caso puede consistir en resultados que permiten interpretar un resultado de un maquinado o medición como perteneciente a ambos casos, o mejor dicho como en casos donde ambos sistemas de dependencia producen semejantes resultados

En nuestro caso no podremos abarcar todos los casos ni las combinaciones, pero se tratará de analizar los casos siguientes como casos tipo

a) Casos de independencia cinemática

Sin efectos de Abbe, con objeto sobre guías o en su eje.
Con efectos de Abbe con alejamiento transversal

b) Casos de dependencia cinemática

Bajos efectos de Abbe
Altos efectos de Abbe

c) Casos 2 1/2 D - 3D

5.3.1 Casos con independencia cinemática.

Este caso se presenta con bajos efectos de Abbe, por su cercanía a guías en el eje X, y por su coaxialidad al eje Y. Según la configuración de la fresadora de la figura 5.8.

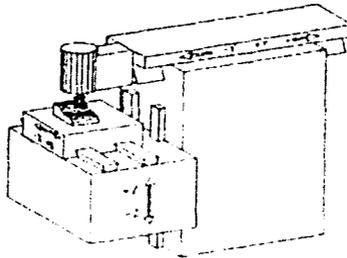


Figura 5.8. Máquina con independencia cinemática entre los movimientos z/y y x/y .

Un patrón de orificios o maquinados periódicos ortogonales se presentarían en este caso con las características siguientes

La mesa se mueve en una trayectoria a la que contribuyen la forma de guías y su ensamble con correderas, en la que los errores rotacionales y traslacionales están relacionados por su derivada. Ver figura 5.9

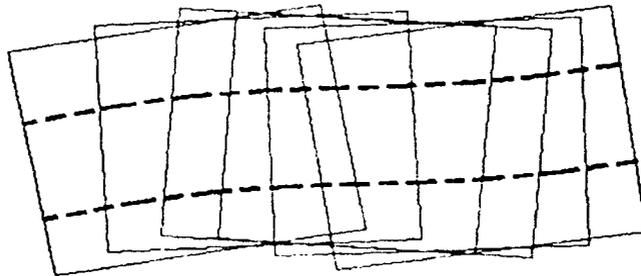


Figura 5.9 Trayectorias de la mesa sobre guías de deformación libre.

El viaje del soporte de la herramienta tiene errores de ortogonalidad y de rectitud, y las trayectorias de la herramienta son alteradas en rectitud por los cabeceos que son sobre el soporte. Pero la forma de la trayectoria de corte es siempre la misma sobre la placa. Ver figuras 5.10 y 5.11

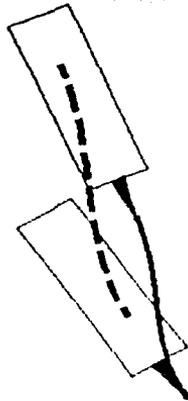


Figura 5.10. Trayectoria del cuerpo porta herramienta y herramienta.

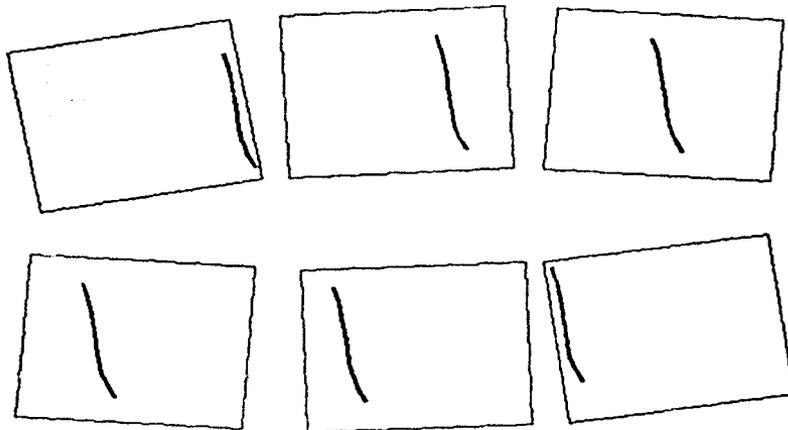


Figura 5.12. Arreglo de trayectorias sobre placa en las diferentes posiciones y orientaciones que la mesa adopta.

El maquinado final a espaciados regulares de una placa de orificios es el siguiente:

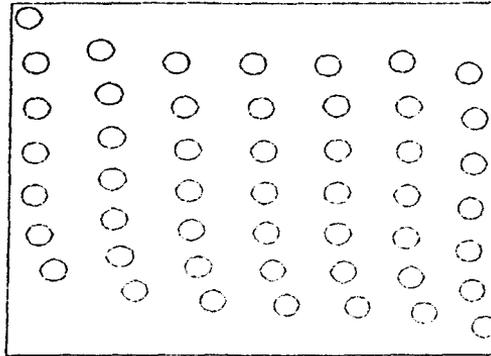


Figura 5.13. Arreglo de orificios de un arreglo reticular deseado.

Las trayectorias mostradas en la figura 5.13 poseen las características geométricas siguientes:

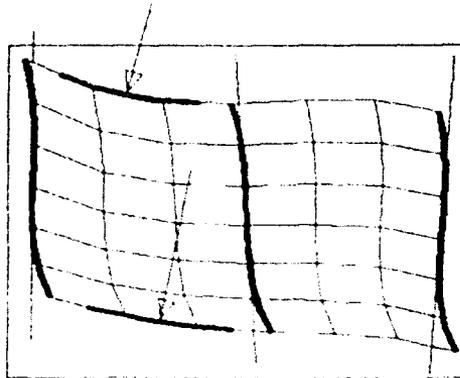


Figura 5.14. Trayectorias x , y de una máquina con movimientos independientes.

Las trayectorias de dirección y , son invariantes en forma, solo cambian en posición e inclinación

Las trayectorias de dirección x , no conservan invariancia de forma, pues la curvatura de guías hará aumentar la curvatura en las trayectorias en las regiones cóncavas y las disminuirá en las convexas. Ver figura 5.14

Para idealizaciones donde se presuponga que la separación de los soportes sobre guías están lo suficientemente espaciados en relación a los errores de rectitud, y por lo tanto los errores de cabeceo sean de segundo orden, se puede suponer por un maquinado simple, que los errores de rectitud y escala del eje x , coinciden con sus trayectorias

Para guías con bajas curvaturas, y configuraciones con poca distancia de las herramientas a guías, se puede suponer que los errores de estas coincide con los maquinados

Para la elección de criterios sobre la aplicación de idealizaciones de rectitud y cabeceo, se tiene el recurso de la representación de estas mallas por el elemento geométrico *3d-mesh* de la geometría computacional vistos en el capítulo 4

Para propósitos de diagnóstico y cinemática inversa, a fin de deducir los errores fuente, se recurrirá a los casos mas generales de dependencia cinemática, donde la independencia cinemática son un caso particular

5.3.2 Casos con dependencia cinemática.

Estos casos se presentan en gran cantidad de mesas x, y soportadas, y en máquinas, trazadores o posicionadores con brazos en cantiliver. Con pequeño efecto para los primeros casos, y gran efecto de cabeceo para los segundos. En este último caso de brazos en cantiliver soportados, se potencian además los cabeceos en planos $x-z$ y $y-z$. Ver figuras 5.15, y 5.16

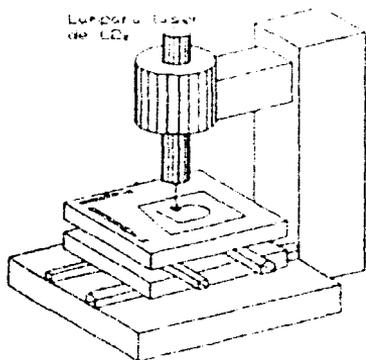


Figura 5.15 La mesa x, y empleada como accesorio es un caso de dependencia cinemática

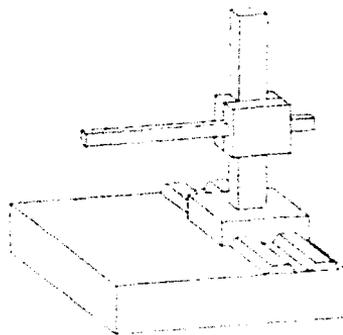


Figura 5.16 Las máquinas con brazo en cantiliver tienen dependencia cinemática

5.3.3 Análisis cinemático plano de móviles con dependencia cinemática

La diferencia de un maquinado con independencia cinemática y otro de dependencia es que en el segundo no se da la invariabilidad de formas de trayectorias. Ver figura 5.17.

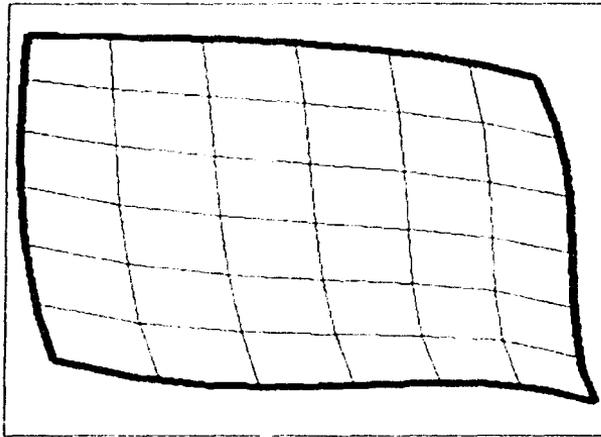


Figura 5.17. Probable patrón de trayectorias en un sistema soportado cinemáticamente dependiente, en que no se conserva la invariabilidad de formas para los mismos recorridos de y en diferentes posiciones en x ni de x para posiciones en y .

En una vista superior de mesa con brazo en cantiliver, se tiene un arreglo cinemático como el mostrado en la 5.18.

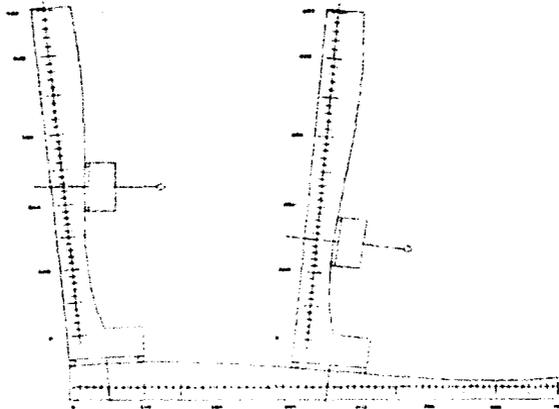


Figura 5.18. Máquina con dependencia cinemática y gran efecto de Abbe, cuyas trayectorias extremas e interpoladas coincide con el patrón de la figura 5.17.

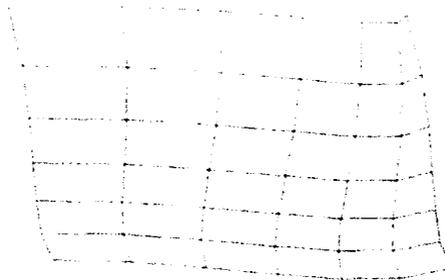


Figura 5.19. Patrón plano de trayectorias extremas e interpoladas de la máquina de la figura 5.18.

5.3.3.1 Primera aproximación de errores fuente de guía principal

Los errores de guías coinciden con forma de trayectorias extremas del lado de localización de guías; en esta caso del lado inferior e izquierdo. Esta aproximación coincide con los trazos engrosados de la figura 5.20.

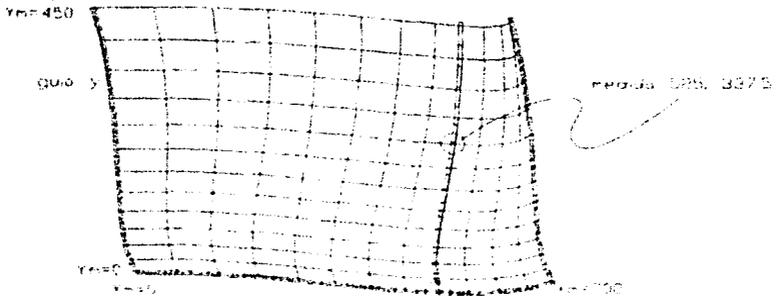


Figura 5.20 Aproximación de guías a trayectorias extremas.

La crítica a esta aproximación es que es poco probable que las herramientas puedan llegar a los límites de las trayectorias, y de que en un análisis más fino, los ensambles de guías izquierdo y derecho no coinciden, como puede apreciarse en la figura 5.21. Esto implicaría que al recorrer el segundo cuerpo soportado sobre el segundo sus mecanismos de ruedas en carros se deformarían.

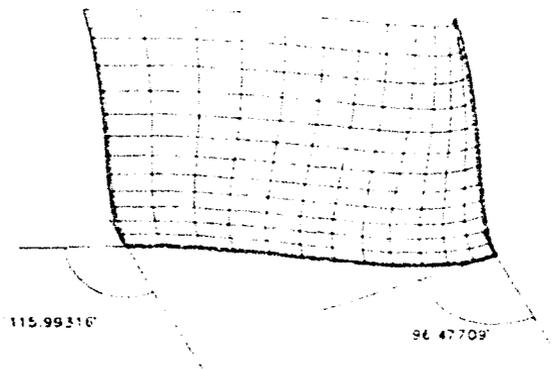


Figura 5.21. Inconsistencia cinemática de ensamble entre móvil x y guía y .

5.3.3.2 Segunda aproximación

Las trayectorias de guías son las trayectorias límite de malla extrapolada. Aunque los elementos de geometría computacional no se pueden extrapolar, existen recursos de manejar las trayectorias extremas de fabricación como trayectorias interpoladas, a fin de calcular trayectorias con valores paramétricos límite, que nos producirán trayectorias extrapoladas. Aplicando este recurso podemos crear familias de curvas como las mostradas en figura 5.22.

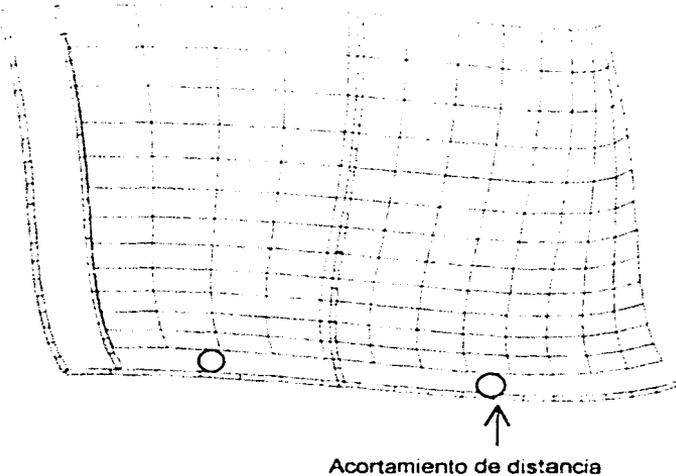


Figura 5.22 Aproximación de trayectorias por extrapolación de parche.

La falla de esta aproximación consiste en que la curvatura al ser continuamente variable, produce trayectorias no envolventes, es decir la distancia de la guía a la trayectoria varía, lo que rompe con el principio de rigidez de cuerpos.

Tercera aproximación. Antes de proponer un método seguro de cálculo de formas de guías, es necesario resumir las condiciones cinemáticas que debe satisfacerla la guía para que produzca el patrón de trayectorias.

Condición primera: Los centros de curvatura de maquinados extremos inferior, superior y de guía coinciden.

Condición segunda: la separación de guías a cualquier trayectoria sin movimiento transversal es constante.

Condición tercera: los ángulos de ensamble de carros con la guía en que se deslizan es constante.

El resumen de estas condiciones se puede apreciar en la figura 5.23.

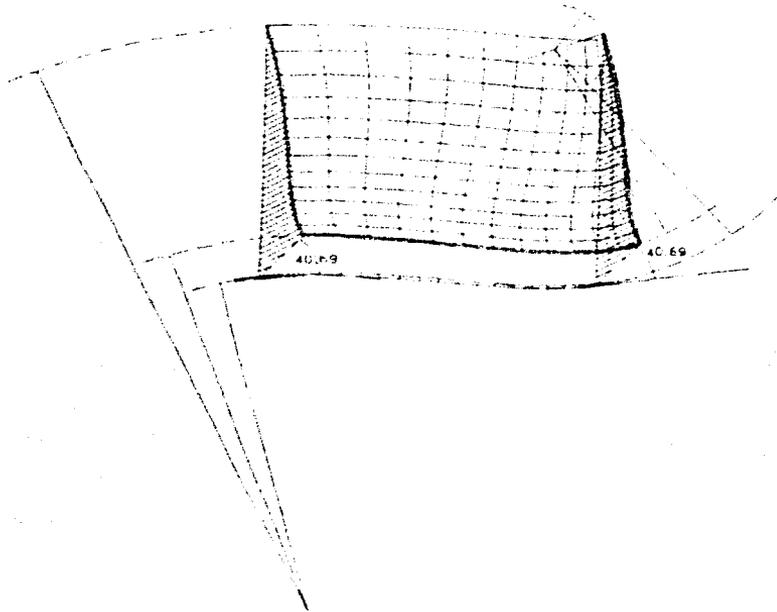


Figura 5.23. Trazo de una guía x , que satisface las condiciones cinemáticas. El triángulo achurado representa la invariancia de trayectorias con guía, el ángulo representa la invariancia de ensamble del carro soporte de la guía transversal, y se puede apreciar los centros de curvatura de trayectorias y guía

Ahora bien, el problema se reduce a calcular la forma y posición de la guía, y la distribución de su escala, representada en este caso por su distribución paramétrica. Considerando que se han elegido elementos no lineales paramétricos de geometría computacional, para el parche de trayectorias y guía, no se considera práctico el desarrollo de métodos algebraicos directos. Una aproximación difícil de establecer en procesos de diseño, es saber dónde se encuentra la guía, pero ordinariamente se conoce el diseño de las máquinas, por lo que el proceso no es totalmente ciego, y el problema se reduce a conocer

ligeras variaciones al diseño de esa guía. Para fines aproximación, sirve entonces el cálculo lineal de error de escala y de ortogonalidad ya estudiados.

Los recursos de cálculo actuales permiten determinar valores de modelos de muchas variables por métodos recursivos basados en técnicas de azar, con la sola evaluación de la bondad de la solución probable. Dentro de tales métodos se encuentran los procesos Montecarlo y los algoritmos genéticos. El siguiente diagrama de flujo ilustra un proceso de cálculo de vértices de control de un polígono de guía a partir de las lecturas de trayectorias y de las condiciones cinemáticas a satisfacer.

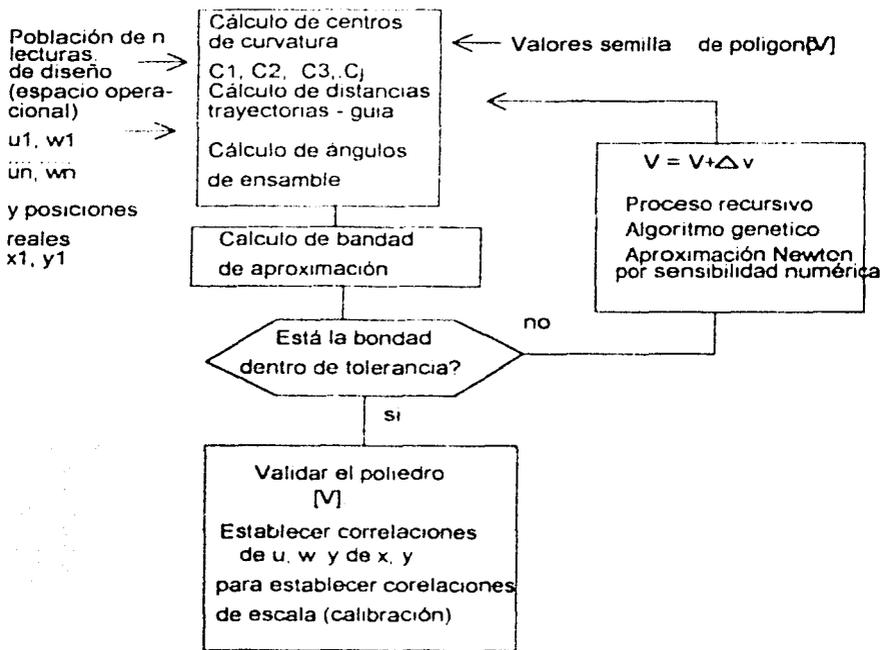


Figura 5.24 Diagrama de flujo de un algoritmo basado en azar para la determinación de los vértices que definen la guía x

Para la determinación de la bondad de la solución se pueden elegir criterios de distancia, o reducir otras magnitudes a distancia o error de distancia en ensambles, como en el caso de

ángulos de ensamble con carros; a su vez la realimentación ΔV puede estar relacionada con el error o con el valor de bondad (fitness en inglés).

5.3.3.3 Determinación de guía transversal cinemáticamente dependiente o soportada.

Para variaciones de palpadores o herramientas en móviles de guía y , se obtienen familias de parches como en la figura 5.25. Las formas de trayectoria para recorridos y , es casi idéntica para recorridos en el extremo izquierdo y en el derecho; sin embargo varían en inclinación para diferentes posiciones en x , y variaciones en concavidad para diferentes longitudes de palpadores o herramientas. Ver figuras 5.25 y 5.26.

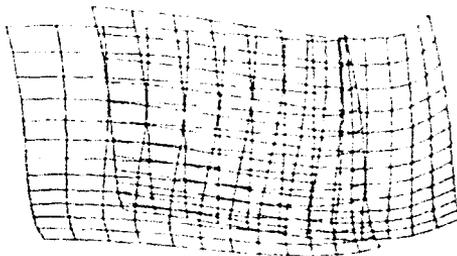


Figura 5.25. Variaciones de patrón de trayectorias para porta herramientas o palpadores alargados.

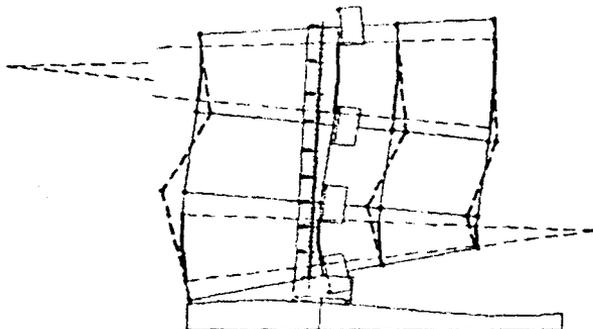


Figura 5.26. Invariancias de familias de trayectorias para porta herramientas o palpadores alargados.

De un análisis cinemático, pero también del análisis de dichas figuras se deduce que la guía y o del segundo cuerpo soportado, hacen la función de guías aquellos elementos que produzcan las mismas posiciones e inclinaciones de móviles, y a los que se pueda asociar una distribución paramétrica, que mapeándola como escala produzca para esas lecturas la misma posición. Se deduce que existe una familia de esplines que cumplen esa condición, ya que los polígonos de vértices de control (líneas discontinuas), muestran una distribución de vértices semejante con las posiciones paramétricas de móviles.

La determinación o diagnóstico final de la forma de guía y, y de escala y, se determina con los datos de diseño de máquina. Partiendo de estos datos es posible entonces aplicar técnicas de aproximación de polígonos moldeadores de guías, por ejemplo los basados en técnicas de azar como los algoritmos genéticos.

Como conclusión del análisis de casos no lineales sin y con dependencia cinemática, o de móviles independientes y soportados, se puede deducir, que los primeros se caracterizan por tener trayectorias iguales en los elementos soportados, que solo varían en inclinación, siendo poco sensibles a la longitud de palpadores o posición de herramientas, y en los segundos las trayectorias de esos elementos soportados o cinemáticamente dependientes varían en inclinación, y en concavidad dependiendo de la longitud transversal de herramientas o palpadores (si son máquinas herramienta o máquinas de medir).

La determinación de forma de guía se efectúa entonces por la aplicación de restricciones cinemáticas a que están sujetos los móviles, en el peor de los casos por algoritmos de tanteo aleatorio. La determinación de modelos b-spline, que relacionan directamente espacio articular y operacional del campo de medidas se hace por manipulación de modelos con algoritmos genéticos o con técnicas algebraicas de reducción de valores singulares, o determinación a priori de valores paramétricos. Es decir, en el último caso si se conocen valores de escala [U], [W] (espacio articular) y valores absolutos [X], [Y] (espacio operacional), por calibración de patrones u objetos fabricados, se puede determinar [Vx] o [Vy] que definen los poliedros de las ecuaciones paramétricas siguientes, que correlaciones de ambos espacios

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-u_1)^3 & 3u_1(1-u_1)^2 & 3u_1^2(1-u_1) & u_1^3 \\ (1-u_2)^3 & 3u_2(1-u_2)^2 & 3u_2^2(1-u_2) & u_2^3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (1-u_n)^3 & 3u_n(1-u_n)^2 & 3u_n^2(1-u_n) & u_n^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} & X_{14} \\ X_{21} & X & X & X \\ X_{n1} & X & X & X \\ X_{n1} & X & X & X_{n4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (1-w_1)^3 & \dots \\ 3w_1(1-w_1)^2 & \dots \\ 3w_1^2(1-w_1) & \dots \\ w_1^3 & \dots \end{bmatrix} \quad (5.5.1)$$

$$y \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-u_1)^3 & 3u_1(1-u_1)^2 & 3u_1^2(1-u_1) & u_1^3 \\ (1-u_2)^3 & 3u_2(1-u_2)^2 & 3u_2^2(1-u_2) & u_2^3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (1-u_n)^3 & 3u_n(1-u_n)^2 & 3u_n^2(1-u_n) & u_n^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y & Y & Y \\ Y_{n1} & Y & Y & Y \\ Y_{n1} & Y & Y & Y_{n4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (1-w_1)^3 & \dots \\ 3w_1(1-w_1)^2 & \dots \\ 3w_1^2(1-w_1) & \dots \\ w_1^3 & \dots \end{bmatrix} \quad (5.5.2)$$

5.3.4 Análisis de casos 2½ D y 3D.

Como se dedujo en el análisis plano no lineal, el diagnóstico de forma de guías y de escalas se establece mapeando los dos espacios en un parche plano, y extrapolando la forma de guías con datos de diseño de máquinas y con restricciones cinemáticas. Es necesario pues, determinar un parche de correlación. En el espacio 3D, los objetos geométricos de correlación son los elementos llamados hiperparches, o sólidos de cuatro caras bicúbicas, que quedan definidos por 64 vértices en 3D.

Hiperparches mostrados ya en este trabajo son los cubos deformes del capítulo IV. Para la obtención del hiperparche se tienen que re-arreglar los parches bicúbicos de la forma

$$p = \begin{bmatrix} (1-u)^4 & 3u(1-u)^3 & 3u^2(1-u)^2 & u^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{11} & V_{12} & V_{13} & V_{14} \\ V_{21} & V_{22} & V_{23} & V_{24} \\ V_{31} & V_{32} & V_{33} & V_{34} \\ V_{41} & V_{42} & V_{43} & V_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (1-w)^4 \\ 3w(1-w)^3 \\ 3w^2(1-w)^2 \\ w^3 \end{bmatrix}$$

de la forma que se tengan cuatro capas de matrices $[V]$ para a su vez interpolar p con una tercera matriz de interpolación K

$$K = \begin{bmatrix} (1-\kappa)^4 \\ 3\kappa(1-\kappa)^3 \\ 3\kappa^2(1-\kappa)^2 \\ \kappa^3 \end{bmatrix}$$

El proceso de interpolación permitiría efectuar cuatro interpolaciones para cada capa con u , w , y mediante un proceso de interpolación transversal con κ , obtener posiciones intermedias. Dicho proceso se puede implementar en un algoritmo en una PC, y por otra parte, excede la intención de esta tesis el conformar una ecuación matricial de hiperparches.

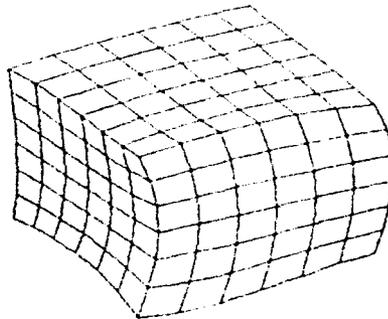


Figura 5.27. Hiperparche tricúbico que relaciona u , v , w (articlar) con x , y , z (articlar).

La pretensión de correlacionar espacios articular y operacional con hiperparches, implica la necesidad de fabricar patrones u objetos de 64 posiciones con arreglos de no más de 16 posiciones coplanares y no más de cuatro posiciones alineadas; lo que se ha traducido en una imposibilidad tecnológica. Los patrones tridimensionales más densos se limitan a 8 o 12 posiciones no coplanares. Ante la dificultad de construir y medir tales patrones u objetos, se ha recurrido a calibrar en planos principales con patrones planos o 2D, como se muestra en la figura 5.28, obteniéndose la información cecreana al "hiperparche" tricúbico.

La información requerida para definir o solucionar parches bicúbicos, a fin de aproximarse a un hiperparche, requiere información tridimensional, es decir no es suficiente con maquinar placas de orificios, sino que se requieren de maquinados que se posean información de profundidad, como conos o esferas.

Los laboratorios principales de calibración ordinariamente no recurren a este patrón, y simplifican nuevamente la información de placas de orificios a proyecciones planares, sobre las caras principales de cubos, permaneciendo entonces la distribución no lineal distribuida planarmente sobre las caras principales. Ver figura 5.28.

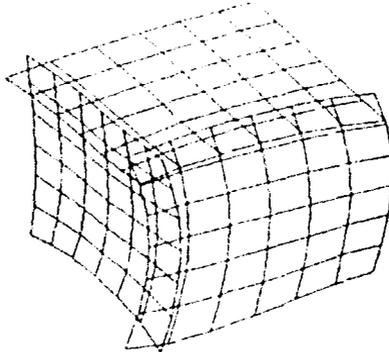


Figura 5.28 Aproximación a un hiperparche tricúbico por parche bicúbicos en caras.

La información tridimensional del hiperparche realmente no se obtiene, y se juzga no necesaria, partiendo de la idealización de que gran parte de trayectorias en el espacio son semejantes, y que la información de profundidad de un parche es proporcionada por el parche localizado perpendicularmente, cuando menos en el límite. Estas aproximaciones a hiperparches se conocen como hiperparches 2½ D.

El Instituto Federal Fisicotécnico Aleman, recomienda a la calibración de mecanismos tridimensionales por la medición de placas de orificios colocadas en 4 posiciones [9]. Ver, figura 5.29.

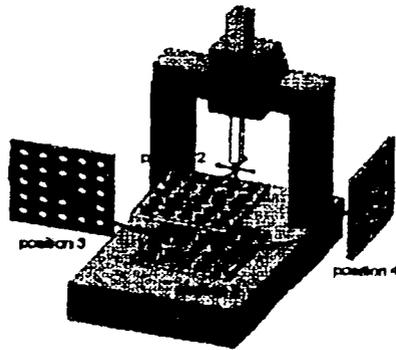


Figura 5.29. Colocación de patrones para una calibración de acuerdo al PTB

Sin embargo la ausencia de información e idealizaciones falsas pueden llevar a un diagnóstico incompleto o erróneo, como puede ocurrir cuando se diagnostica una máquina con errores de giro (roll) similares a la mostrada en la figura 5.30, en donde un hiperparche "alistonado" no se puede definir con las placas verticales colocadas en cruz.

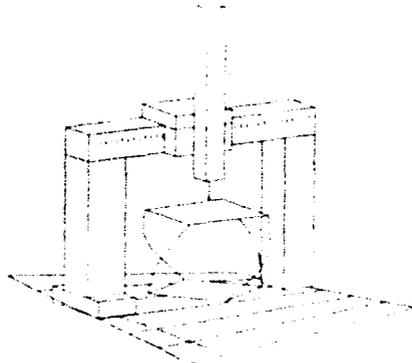


Figura 5.30. Representación de un defecto en una máquina para el que el proceso PTB es poco sensible

Finalmente, una propuesta de este trabajo de investigación consiste en la idealización de que los desplazamientos e inclinaciones (cabeceos) de cuerpos cinemáticos están relacionados por su derivada. Partiendo de la correlación de posiciones e inclinaciones, se puede producir un parche desplazado que representa el viaje del husillo de la herramienta,

resumiendo en este parche los defectos de escalas y guías que lo soportan (el análisis de su dependencia cinemática se considera cubierto en el análisis planar). A su vez, los defectos de rectitud y escala, para pequeños viajes del husillo se pueden considerar de segundo orden, o comparables a errores de redondez de herramientas o de flexión de husillos

La técnica de mapeo de viaje de husillo a partir de la calibración de placas de esferas propuesta por Sánchez et al [10], se ejemplifica en la figura 5.31, y permitirá establecer idealizaciones que resuelvan un hiperparche como se pretende en un mapeo de errores 3D.

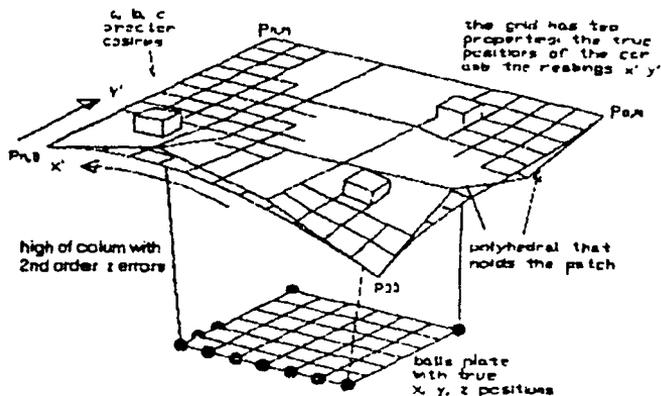


Figura 5.31. Obtención de parches pieza y herramienta para bajas variaciones en z.

En este caso, la posición del cubo sobre el parche superior representa el viaje del husillo de la máquina que genera el arreglo de esferas de la placa

5.4 ANÁLISIS DE FENÓMENOS DE HISTERESIS

5.4.1 Aproximaciones lineales a casos de histeresis.

Finalmente abarcamos el tema de la histeresis que sistemáticamente es el más evitado en los artículos de tipo científico, con la salvedad de que algunos autores los analizan basándose en redes neuronales. Nuestro punto de vista es que los problemas de histeresis se deben a varias causas que numeradas de mayor a menor efecto son: a) juego (backlash) de mecanismo, condiciones de ensamble diferentes a mínimas restricciones, b) comportamiento viscoso de grasas aceites y partes plásticas, c) liberación rápida de esfuerzos residuales por cambio de movimiento, y liberación lenta de esfuerzos residuales por memoria de materiales, d) los anteriores pero sin repetibilidad al variar perfiles de excitación (fuerza aplicada para movimiento)

A su vez, nuestro análisis se enfoca sobre los efectos que son constantes o proporcionales con el desplazamiento, y nos limitaremos a describir aquellos que estamos seguros tienen un equivalente cercano con la realidad, sin perjuicio de su corrección por posterior comprobación mediante experimentos

La descripción de fenómenos de histéresis se puede hacer con gráficas que correlacionan espacio articular (el lugar donde se desea el desplazamiento de herramientas o palpadores de medición), y el espacio operacional (el lugar donde realmente se posicionan las herramientas)

En una herramienta con actuadores de tornillo no precargado, la tuerca se recarga en un flanco del filete de la rosca cuando avanza en una dirección y en el otro flanco cuando va en sentido contrario. Este fenómeno también ocurre y se intensifica cuando en el ensamble entre un carro y una bancada hay juego, o no se respetan condiciones de mínimas restricciones. La historia del movimiento se describe en el gráfico 5.32, donde de una posición de equilibrio no recargada, se parte con movimiento positivo, el móvil permanece en su lugar hasta llegar a un umbral evaluado en 0.1 unidades en este gráfico. Mientras no se cambie de dirección, el móvil irá atrasado 0.1 unidades. Al regreso del movimiento, el móvil permanecerá por 0.2 unidades en reposo antes de que inicie su movimiento en sentido inverso. Ver dibujo inferior de gráfico.

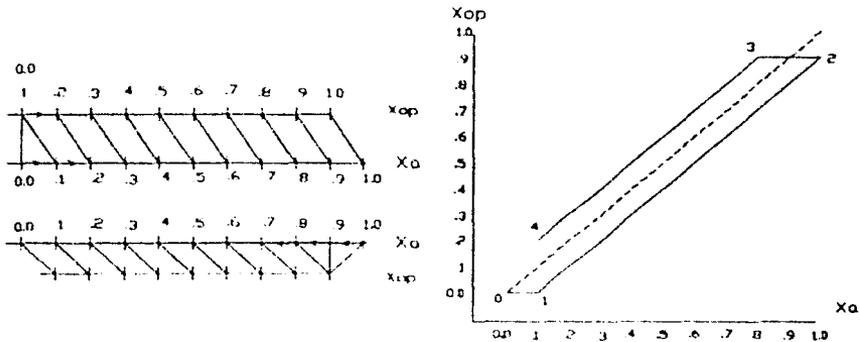


Figura 5.32. Representación del retraso (x_{op}) de una herramienta con variación de sentido de movimiento, hacia la derecha arriba y hacia la izquierda abajo

Aplicando esta historia de movimientos a un maquinado de dos dimensiones, tenemos que atender a la historia de movimientos para obtener un patron aproximado de desvios de posiciones, cuando se tienen sólo errores lineales de histéresis. Para la historia de movimientos de un maquinado reticular periódico de 6 columnas por 6 renglones de orificios, como se muestra en la figura 5.33, se tienen las condiciones de desvío (orificios

sólidos), mostrada Ver figura 5.34 Y la representación de sus desvíos amplificados es el de la figura 5.35

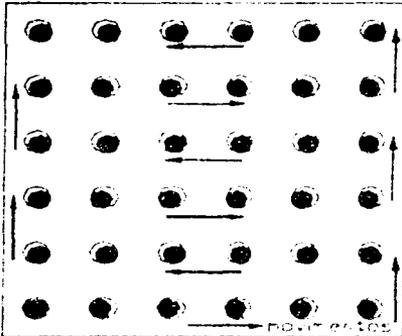


Figura 5.33 Comparación de diseño (círculos vacíos) y maquinados (círculos sólidos), para un proceso de maquinado con histéresis

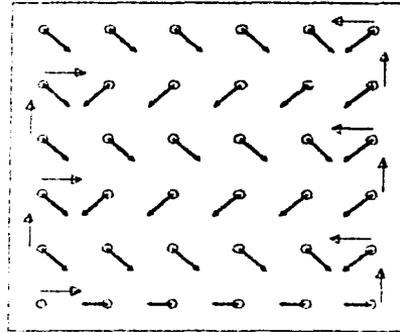


Figura 5.34 Amplificación de errores para un proceso de maquinado con histéresis

Para un movimiento circular programado en CNC, la maquina herramienta que tiene atrasos de ± 0.5 unidades por eje, producira las trayectorias mostradas en línea gruesa de la figura 5.35. Para un recorrido contra las manecillas del reloj. Notense las trayectorias rectas en regiones de cambio de dirección

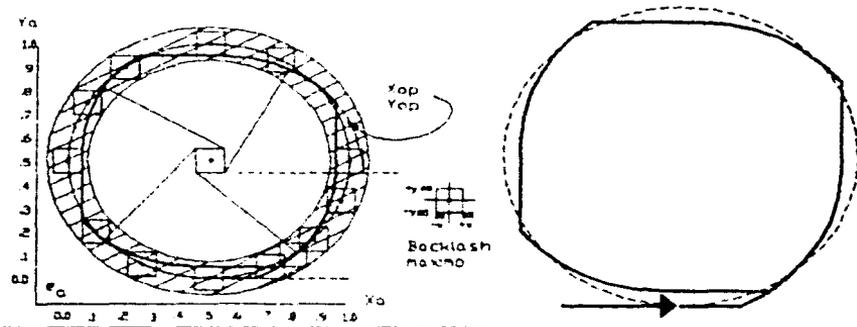


Figura 5.35 Comparación de diseño y maquinado, para un proceso de maquinado continuo no lineal con histéresis

Es lógico suponer que parte de los retrasos de movimientos disminuye, por ejemplo, en los recorridos $-x$ del maquinado de placas, es de suponer que los atrasos $-y$ son minimizados

por efecto de vibraciones alcanzando en corto en largo su posición de equilibrio o de no retraso; pero no así los de x . Finalmente para estos casos podemos aproximarnos al gráfico 5.36. en que se ve que las componentes verticales de los retrasos disminuyen mientras se conserva el movimiento transversal

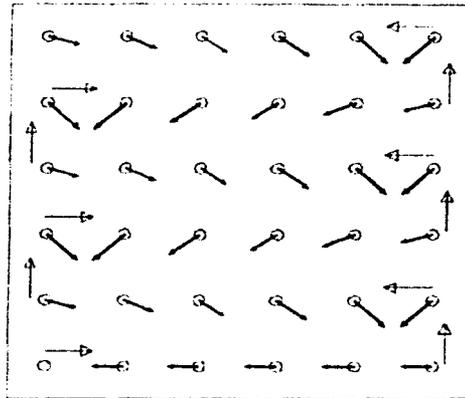


Figura 5.36 Amplificación de errores para un proceso de maquinado con histéresis y relajación.

El efecto de tal relajamiento de estados retrasados o de esforzados no liberados, en trayectorias continuas circulares produciría trayectorias curvas en donde antes se produjeron trayectorias rectas. Ver figuras el del gráfico 5.37

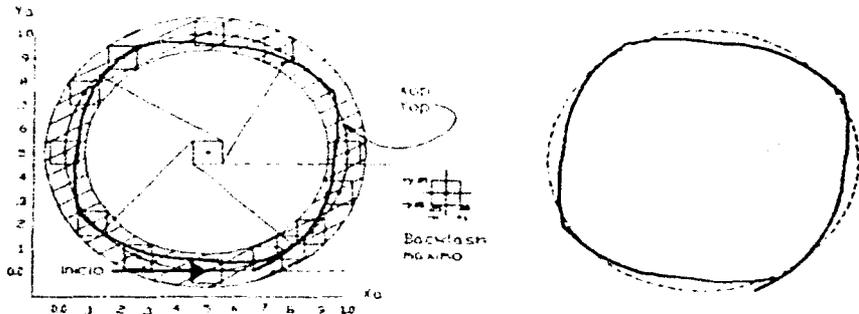


Figura 5.37. Comparación de diseño y maquinado, para un proceso de maquinado continuo no lineal con histéresis y relajación. Nótese la semejanza con figura 5.35, sin relajación.

Lo que produce un patrón con prácticamente el mismo aspecto.

De los aspectos de desvios de maquinados con desplazamientos discretos se puede deducir que la magnitud o rango total del backlash es la diferencia absoluta de desvios entre maquinados con cambio de dirección. Del aspecto de maquinados por desplazamientos continuos con curvatura podemos deducir que el backlash (mitad del intervalo total), es la variación de circularidad de trayectos curvos y trayectos rectos (o menos curvos)

5.4 INTEGRACIÓN DE RECURSOS AL ESTUDIO DE CASO: FRESADORA 3D Y PLACA DE VIDRIO.

Para fines de evaluación de máquinas de medir se fabricó en el Centro de Instrumentos UNAM una placa de vidrio, con un diseño de 6 x 6 esferas espaciadas 50 mm en ambas direcciones. El proceso inicial consistió en el corte de tales esferas con una herramienta de diamante, montadas en una fresadora de tres ejes mostrada en la figura 5.38



Figura 5.38. Proceso de maquinado de una placa de vidrio en una fresadora de cuatro ejes (solo se utilizan tres)

La trayectoria de corte se muestra en la figura 5.39

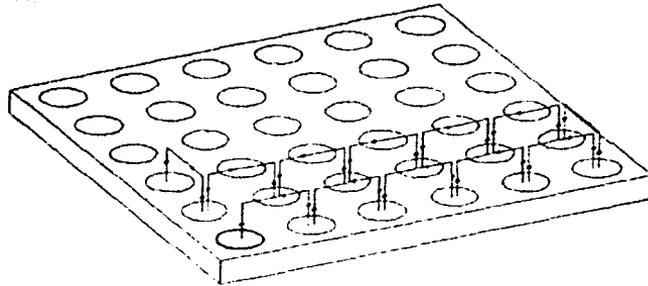


Figura 5.39 Trayectorias de corte de placa de vidrio.



Figura 5.40. Placa de vidrio después de los procesos de corrección, que se usará como patrón.

Donde se puede apreciar que el recorrido z fue idéntico para todos los maquinados y no posee información relativa que revele backlash en ese eje. Los recorridos fueron por renglones con cambio de dirección en renglones pares. Se sabe además que la fresadora fue recientemente ajustada en metales de colas de milano. En estas condiciones de maquinado se espera que si tiene un comportamiento similar al discutido para maquinados en arreglos ortogonales, la interpretación de backlash será bastante coincidente con la realidad.

La evaluación de los cortes en la placa mostraron la carta de defectos mostrada en 5.41, calibrada en la máquina de coordenadas del centro de Instrumentos.

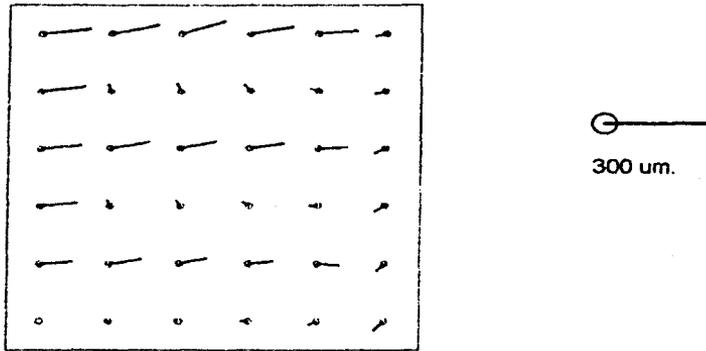


Figura 5.41. Carta de calibración (proyección horizontal) de placa de vidrio; primer maquinado.

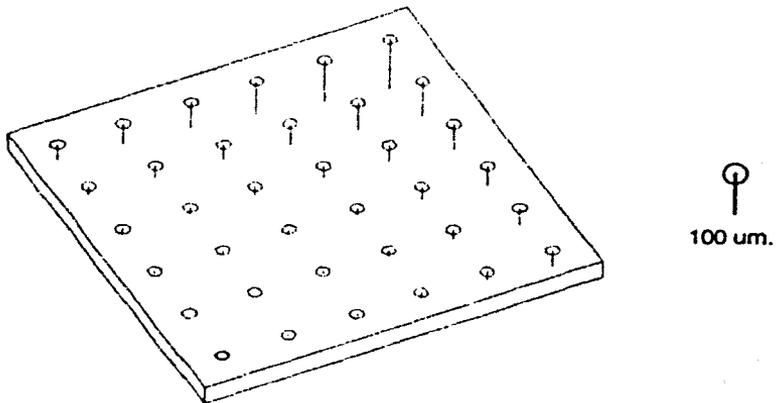


Figura 5.42. Carta de calibración (proyección vertical) de placa de vidrio; primer maquinado.

Aunque el propósito de la placa es el de calibrar máquinas de coordenadas, en su primera fase de aproximación, estas se convierten en instrumentos patrón dada su muy superior calidad respecto a las máquinas herramienta

5.5.1 Evaluación cualitativa.

En primer lugar se observa que en el extremo inferior izquierdo no se reporta error vertical u horizontal, lo que nos indica que este elemento es tomado como origen, eligiéndolo también como origen, le asignamos la identificación $i_j = (1, 1)$, así mismo se observa el renglón inferior con bajos errores en y, lo que nos permite alinearlos o suponer que este renglón se tomo como referencia. Los errores promedio se estiman en 100 micrómetros

En segundo lugar observamos variaciones en el sentido horizontal del error, lo que nos revela errores de histeresis bastante acentuados, conservando la magnitud cuando hay cambio de sentido de movimiento

En tercer lugar observamos variaciones transversales y del error a lo largo de los recorridos x.

En cuarto lugar observamos variaciones casi lineales de error vertical z, en recorridos extremos, y cóncavos hacia abajo en diagonales, con errores promedio de 50 micrómetros.

5.5.2 Evaluación cuantitativa.

5.5.2.1 Aproximación lineal

La correlación de lecturas se puede hacer sumando los errores a las posiciones nominales, lo que nos produce la matriz de correlación entre diseño y valores de calibración para el arreglo:

$$X = UM^T \quad M = \begin{bmatrix} 0.9998 & -2.08915E-08 & 0 \\ -0.0197 & 1.00016 & 0 \\ -4.82864E-05 & -5.328661-07 & 1 \end{bmatrix}$$

Y factorizando y reduciendo obtenemos los errores promedio siguientes:

Ortogonalidad = 0.01718 grados

Factor de escala X = 0.9998

Factor de escala Y = 1.00016

Corrigiendo los errores por los recíprocos de estos factores obtenemos la carta:

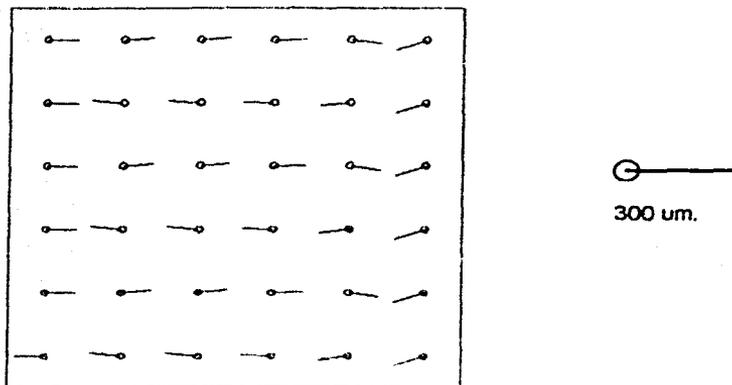


Figura 5.43. Mapeo de errores corregidos por escala y ortogonalidad.

La magnitud promedio de errores ha bajado poco sensiblemente, pero se han homogeneizado en magnitud. El arreglo de errores marca una clara equivalencia de errores de histéresis, de magnitud aproximada de 80 micrómetros.

5.5.2.2 Aproximación no lineal.

Los errores de rectitud se consideran no lineales, por no poder ser representados por funciones lineales, sus amplitudes se estiman en 40 micrómetros, y una aproximación cuantitativa de rectitud se pueden aproximar por el trazo de arcos en estos errores. El procedimiento se puede aplicar también en la calibración vertical.

Pero para la correlación completa se necesita definir el hiperparche bicúbico pretendido en 5.3.4, que correlaciona en 3D los espacios articular y operacional, y con la aplicación de restricciones cinemáticas similares a "Análisis cinemático de móviles con dependencia cinemática" y "Determinación de guía transversal cinemáticamente dependiente o soportada" ya analizados para el caso 2D, y algoritmos de solución no lineal se puede obtener el diagnóstico de guías 3D.

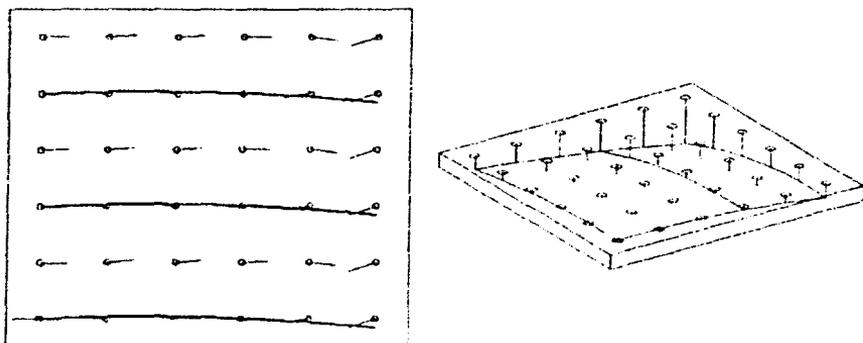


Figura 5.44. Aproximación cuantitativa de los errores de rectitud.

Por otra parte, considerando la inmunidad o poca sensibilidad de muchos procesos a variaciones o errores en dirección z , se puede aproximar un hiperparche con la información de posición 3D de placas de esferas, con la salvedad de que la variación entre la primera y última capas es lineal. Ver figura 5.45.

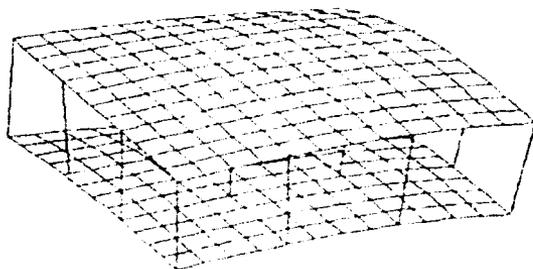


Figura 5.45. Construcción de un hiperparche tridimensional de desplazamientos y errores amplificados, para pequeños desplazamientos y pequeños errores en z .

Y el ensamble de este hiperparche sobre la máquina - herramienta, nos provee la información del viaje relativo del husillo de la herramienta respecto de la mesa. Ver figura 5.46.

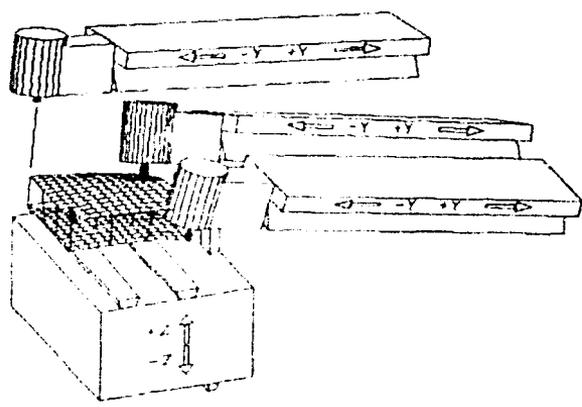


Figura 5.46. Errores relativos del husillo y carro del husillo respecto de la mesa.

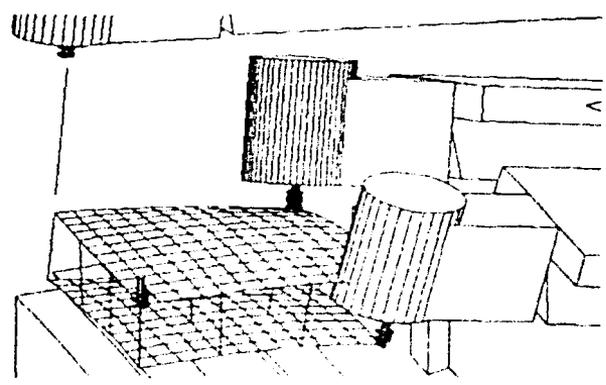


Figura 5.47. Errores relativos del husillo y carro del husillo respecto de la mesa (Acercamiento).

Este viaje relativo nos provee información del viaje del husillo, y deberá coincidir con las trayectorias "Y" de las capas del hiperparche, también equivale a decir que el husillo tiene

para una posición de su recorrido, centros de curvatura (en dos planos), que se conservan con el viaje de la mesa; y la mesa tiene igualmente dos centros de curvatura (en dos planos) para cada posición. Adicionalmente, esta información permite aproximarnos a los errores de giro alrededor de los ejes de recorrido (roll)

5.5.3 Interpretación de información de hiperparches.

El análisis de datos proporcionado por el hiperparche nos reporta errores relativos entre mesa y carro del husillo, para un conjunto e intervalo de valores del espacio operacional; pudiendo producirse esos por una familia infinita de combinaciones de errores fuente de mesa con errores del carro del husillo, y una cadena cinemática. Pero la imposibilidad de obtener cada error actual de todos los elementos de la máquina, parece menos grave si se parte del hecho que para altas exactitudes no es posible la calibración directa de cada error fuente, sin correr el riesgo de añadir un efecto nuevo (principio de incertidumbre), y lo importante es conocer la operación, o resultados de fabricación o medición, respecto de los datos de diseño o del espacio operacional, una vez elegido un sistema interno de referencia.

Esta discusión y análisis permite afirmar que la correlación relativa interna de errores con valores de espacio articular, permite sin lugar a ambigüedades, corregir los datos de este espacio y cancelarlos en el espacio operacional. De esta forma queda justificada la **Hipótesis D**: "Para los objetivos de predicción de comportamiento, corrección de medidas o trayectorias, o corrección de errores fuente, **es intrascendente la distinción exacta de cada error contribuyente**, y solo importa que la correlación de entradas y salidas sea satisfecha por una combinación de errores fuente e intermedios, acoplados en las cadenas cinemáticas"

5.5.3.1 Interpretación final de trayectorias y escalas.

Una vez aclarada la utilidad de contar con información relativa de movimientos entre elementos, un diagnóstico de partes se puede obtener por la sobreposición de cuerpos, de la manera como se sobreponen los seguidores de una leva para determinar el perfil de esta última, las posibilidades geométricas de ensamble dependen del diseño de guías. En este caso tendrá que encontrarse una forma de apoyo que produzca giros y desplazamientos consistentemente.

La determinación de escalas, se establecerá por distribuciones cúbicas de trazos, cuya distribución coincida con alguna línea alineada del hiperparche, o una proyección de esta.

CAPITULO VI

RESULTADOS.

CONCLUSIONES.

RECONOCIMIENTOS.

6.1 RESULTADOS.

De acuerdo al objetivo del Capítulo I, de dar a conocer la importancia de la instrumentación virtual de manera general, y de dar a conocer principios de diseño y operación de instrumentos mecánicos de precisión de forma particular, se estima que se han cubierto los objetivos de introducir al tema en el propio capítulo primero, y que la presentación del capítulo II basada en gráficos, SI transmite los conceptos de evolución de exactitud y principios actuales básicos en que se basa la instrumentación mecánica de precisión

Dentro del contexto de exactitud, se considera necesaria la presentación y discusión de modelos estándar de error, y se estima que se han resumido, discutido y justificado suficientemente en el Capítulo III, los modelos que anteceden esta tesis

El capítulo IV empleo los conceptos ya empleados en robótica, de espacios articular y operacional, y las posibilidades de su correlación directa, como alternativas simples y útiles para diagnóstico y corrección lineales de mecanismos, y la edición de segmentos volumétricos lineales, para aproximaciones no lineales

La propuesta de emplear modelos de la geometría computacional, principalmente la familia de primitivas b-spline, como modelos de correlación y como modelos de representación de partes de máquinas (guías y escalas), se considera que es la idea básica sobre la que descansa esta tesis

Se estima que el empleo de b-splines en la construcción de partes, y el análisis algebraico que relaciona espacios articular y operacional, completado con análisis cinemáticos, satisfacen las expectativas de lo que se considero en el Capítulo I constituye a un Instrumento Virtual

Finalmente en el capítulo V, se inicia un análisis de histéresis, que es un tema sistemáticamente evitado por los centros de investigación en metrología y en nanotecnología, o del que se evita sistemáticamente su publicación. Este análisis se ha simplificado a comportamientos lineales, esperando que los no lineales tengan discrepancias sólo menores, pero que integran todo un paquete de análisis, en el que además pueden predominar estos efectos

Finalmente se estima que los análisis de hiperparches y su traslación al espacio de máquinas herramienta deformes, ha convencido de su utilidad y suficiencia para compensar defectos origen, o procesos de medición o fabricación.

6.2 CONCLUSIONES

- 6.2.1 El instrumento virtual basado en primitivas de geometría computacional, satisface las expectativas de predicción de comportamiento de mecanismos, de la representación de sus errores, y de operación y corrección de procesos
- 6.2.3 El instrumento virtual es el recurso por antonomasia, para transmitir las ideas de fenómenos de error 3D en la enseñanza de ingeniería de precisión, ya que la aridez del álgebra pura, puede distraer y confundir los propósitos de la modelación de errores
- 6.2.5 El diseño de procesos de calibración 2^o D, debe considerar los probables desvíos que el comportamiento real de una máquina puede alejarse de la linealidad. Para altas exactitudes, se debe tener presente que los diagnósticos están referidos a sistemas no universales, sino relativos, pero que su robustez radica en que se tienen correlaciones de todos los grados de libertad involucrados sin ambigüedad.
- 6.2.6 Como continuación de la presente investigación, es necesario desarrollar modelos más finos de predicción de fenómenos de histeresis y validarlos, a fin de incluirlos en un contexto de sistemas expertos de predicción de comportamiento de instrumentos y corrección de procesos

6.3 RECONOCIMIENTOS.

El presente trabajo está basado en los antecedentes de la línea de trabajo "Instrumentación Virtual" que el laboratorio de Metrología del Centro de Instrumentos UNAM lleva a cabo como actividad de investigación permanente para perfeccionar los procesos de Calibración de Máquinas de Coordenadas, que realiza con reconocimiento oficial. Dentro de los recursos empleados ya desarrollados por el Centro de Instrumentos, destacan a) una interfaz gráfica de comunicación entre arreglos cinemáticos, bases de datos de mediciones y AutoCAD 10, b) Ambiente de manipulación y solución de matrices y de b-Splines

Otros antecedentes de este trabajo son las Tesis sobre los temas de Calibración de Planos Patron dirigida por el Ing Sergio Padilla Olvera, sobre Procesos de Diagnóstico de Máquinas Herramienta por medio de Calibres Cilíndricos y Autocolimadores, dirigida por el Ing Rigoberto Nava Sandoval, y sobre Interfaces de Comunicación de Máquinas Tridimensionales de Medir, dirigida por el M. En I. José Sánchez Vizcaino. Todas ellas y otros trabajos de investigación, han arrojado luz sobre este tema tan desconocido de Ingeniería de Precisión y que aquí brevemente se resume

Los estudios de caso se llevaron a cabo con las muestras de datos del maquinado de una placa de vidrio realizada en una máquina herramienta de cuatro ejes (sólo se utilizaron tres), del Centro de Instrumentos. Otras pruebas realizadas en el Instituto de Investigación en Materiales UNAM, sobre placas de aluminio, arrojaron resultados todavía más acentuados en fenómenos de histeresis, que no se documentaron por haberse perdido en los remaquinados, pero que permitieron establecer generalizaciones.

Dando debido reconocimiento a los antecedentes de investigación en diagnóstico de máquinas y de instrumentación virtual, es necesario señalar como original y nuevo de este trabajo: a) la modelación de fenómenos de histeresis, b) la integración de fenómenos de histeresis en la problemática general de la máquina herramienta, y su distinción en las cartas de calibración donde están integrados a otros defectos, c) el escalamiento de parches 3D a Hiperparches 2^o D para relacionar errores internos entre partes, d) el traslado de estos hiperparches a la máquina herramienta virtuales, y el escalamiento de sus errores, a fin de ejemplificar los errores fuente o sus combinaciones que producirían tales hiperparches de error.

APENDICE A

GLOSARIO DE TÉRMINOS

A.1 TÉRMINOS BÁSICOS DE LA CIENCIA DE LAS MEDIDAS

Magnitud. Atributo de un fenómeno o de un cuerpo que es posible diferenciar cualitativamente y de determinar cuantitativamente. Ejemplos: masa, tiempo, temperatura.

Magnitud Básica. Magnitud que se considera independiente de otras, en un sistema de magnitudes. Ejemplos: en el sistema SI: longitud, masa, tiempo, temperatura.

Magnitud derivada. Magnitud que dentro de un sistema de magnitudes se considera función de otras más elementales o básicas. Ejemplos: en el sistema SI: presión, energía, potencia.

Sistema de magnitudes. Conjunto de magnitudes que definen un sistema de magnitudes de base y derivadas y sus expresiones de definición.

Dimensión de una magnitud. Expresión exponencial de una magnitud en términos de magnitudes básicas de un sistema de magnitudes. Ejemplo: Fuerza, presión

$$F = MLT^{-2} \quad P = ML^{-1}T^{-2}$$

Escala de una magnitud. Es la expresión, base de datos, trazo o cualquier dispositivo que defina el valor de una magnitud.

Medición. Es la acción de comparación por medio de la cual se define el valor de una magnitud en función de las unidades de esa magnitud.

Unidad. Es el valor de esa magnitud cuyo valor convencional es la unidad.

Patrón. Es el dispositivo, o definición que permite reproducir el valor unitario de esa magnitud o sus múltiplos o submúltiplos. Ejemplos: Kilogramo masa es la masa física que se encuentra en un laboratorio de Sevres Paris en el BIPM, Metro es el recorrido de la luz en el vacío en una fracción de tiempo de $1/299792458$ segundos.

Principio de medición. Es la naturaleza del experimento en el que se basa la medición. Ejemplo para la medición de masas se pueden explotar ambos principios para definir fuerza: el de medición de desplazamientos en resortes, o por la medición de efectos inerciales sobre masas conocidas.

Método de medición. Es la naturaleza del proceso de comparación entre patrones o instrumentos, y objetos. Podemos distinguir entre otros los siguientes:

Método de medición directa. Es el método de medición en que el valor de la magnitud se determina directamente por el dato arrojado por el instrumento de medición. Ejemplo: el diámetro de un cilindro por un vernier.

Método de medición indirecta. Es el método por el cual se define el valor de una magnitud a través de la medición de otras magnitudes y funciones de relación. Ejemplo: aceleración de la gravedad por medio de longímetro y reloj.

Método de medición por sustitución. Es el método que determina el valor de la magnitud a medir, sustituyendo el objeto a medir por otro objeto de magnitud conocida, cuando el dispositivo sensor para ambas coincide. Ejemplos: se puede medir el diámetro de una flecha si se elige un dispositivo de medición de alturas, y se elige una combinación de bloques patrón que producen el mismo efecto. El diámetro se determina cuantificando las longitudes de los bloques.

Método de medición por cero. También llamado **método de medición por nulos.** Es el método de medición en el cual la magnitud a medir se determina llevando el dispositivo sensor entre la magnitud de referencia y la magnitud a medir a cero. Ejemplo: la medición de muy bajos voltajes por el empleo del potenciómetro.

Método de medición diferencial. Es el método de medición por nulos, excepto que si no se alcanza la condición de nulidad, se acarrea la señal no nula del dispositivo sensor.

Método de medición por complemento. Es el método por el cual la magnitud a medir se complementa con otra magnitud conocida, y la suma corresponde a otra magnitud conocida mayor.

Método de medición por transposición. Es el método de medición por el cual la magnitud a medir V se equilibra con una magnitud conocida A en un instrumento, enseguida la magnitud conocida sustituye por la magnitud a medir y se equilibra con otra magnitud conocida B , el valor de la V de la magnitud desconocida se determina por

$$V = AB$$

Método de medición combinatorio en series cerradas. Es un método por el cual el valor de la magnitud a medir se puede determinar estableciendo relaciones entre fracciones que coincidan con el valor de una magnitud conocida.

Método de medición por resonancia. Es un método por medio del cual se puede establecer el valor de una magnitud desconocida cuando se alcanza una condición de resonancia relacionada con el valor conocido de esa magnitud. El caso más común es el de definir frecuencias, múltiplos o submúltiplos, pero el principio se aplica también a la

medición de elasticidades, longitudes, impedancias, donde las frecuencias de oscilación, de resonancia, de propagación, dependen de esas magnitudes [C-B 13]

Proceso de medición. Es el conjunto de operaciones que incluyen: la preparación de una medición, su desarrollo y su interpretación

A.2 TÉRMINOS RELACIONADOS CON CALIDAD DE MEDIDAS E INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN, EXTRAÍDOS DEL VOCABULARIO INTERNACIONAL DE METROLOGÍA LEGAL.

Valor real de una magnitud: es una abstracción conceptual del valor que puede llegar a tener una magnitud, y que está perfectamente definido, por ejemplo c - la velocidad de la luz en el vacío. Es la única constante universal que no se define en función de otras. Propiedad tomada por acuerdo del BIPM. La adopción de esta "definición", tiene la implicación de que en lo sucesivo la velocidad de la luz en el vacío no se mide, se miden las longitudes con un cierto grado de certeza en función del tiempo que esa luz tarda en recorrer, la incertidumbre tendrá como origen nuestra incertidumbre de tiempo pero no de c .

Valor convencionalmente verdadero de una magnitud: Es el valor de una magnitud, que para propósitos de comparación de otro valor de la misma magnitud, puede considerarse de errores nulos o despreciables. Por ejemplo, para propósitos de evaluación de reglas se considera valor verdadero el valor nominal de un bloque patrón.

Error: Diferencia entre el valor medido y el valor real de una magnitud

Error límite: valores límite al rededor del valor verdadero de una magnitud, cuya probabilidad de ser sobrepasado por una medición cualquiera, es menor que $1 - \text{intervalo de confianza establecido}$

Errores sistemáticos: Errores que se repiten en magnitud y signo cuando se mide bajo las mismas condiciones

Errores aleatorios: Errores que no se repiten en magnitud y signo, cuando se repiten las condiciones de medición

Nota: Esta clasificación tiende a desaparecer, aclarando que no existen errores aleatorios, y que no se pueden repetir las mismas condiciones de medición, lo que sucede es el desconocimiento de las condiciones que alteran la medición

Error de histéresis. Es el error que se produce por el cambio de dirección de excitación de un instrumento de medición, ya sea en orden ascendente, o en orden descendente.

Nota: Frecuentemente se asocia a este error un signo y una constante que dependen de la dirección de movimiento, pero en ensayos reales este error resulta mucho más no lineal e irrepetible.

Incertidumbre de una medición: es el intervalo del error definido por sus errores límite. Al igual que este, queda definida por intervalos de confianza, ordinariamente 95% , ó 96% si este intervalo es de 2 veces la desviación estándar de la dispersión de medidas al rededor del valor verdadero

Notas: Esta definición requiere de ajustes a cada aplicación particular, pues aunque existen normas y recomendaciones (DIN 1319, ISO), para su cálculo y expresión, dichas recomendaciones no prevén medidas multidimensionales, medidas basadas en funciones diferenciales, medidas simuladas en ambientes virtuales o en base aleatoria. En este campo la mayoría de investigadores no emplea tales normas y proponen sus propios métodos de determinación. Es un campo polémico sujeto a mejoras, y se propone la lectura de [C-D 9] y [C-D 12] a fin de arrojar luz sobre esta discusión

Repetibilidad: Es la medida de la dispersión de medidas al rededor del valor medio. Para una distribución gaussiana, queda definida por la amplitud de la desviación estándar

Exactitud: Concepto que define el desvío de las mediciones respecto de su valor verdadero. Este concepto engloba ambas **la dispersión de la muestra de medidas, así como el desvío del valor medio**. El concepto cuantifica el error de una medida para un intervalo de confianza, se calcula con los desvíos conocidos o estimados de la media de una muestra, más $n \cdot \text{desvíos estándar}$. Si la muestra es de una medida entonces la dispersión es cero y sólo queda el estimado de su desvío o el dato de desvíos medios para medidas semejantes.

Precisión: El concepto se empleaba antiguamente para designar la repetibilidad de un instrumento de medición. Actualmente los organismos productores de normas recomiendan se evite este concepto, pues debe emplearse repetibilidad que es más idóneo, en el caso límite de muestras de una sola medida, no cabría la definición del término lo cual haría pensar que una sola medida no es precisa.

Notas: No hay universalidad de criterios respecto de estas definiciones; esta pertenece al vocabulario legal que recomienda se emplee exactitud en el término amplio. Por otra parte la recomendación es congruente, pues en el

caso limite de muestras de una sola medición, si cabe el término que si bien no habla de repetibilidad si habla de "bondad" de la medida.

Calibración: conjunto de operaciones que tienen por objeto la evaluación de los errores en magnitud y signo de un instrumento de medición

Notas: El término calibración es frecuentemente confundido con el de Evaluación Metroológica y con otros términos afines como: Accuracy verification, Performance Evaluation, Checking, Pruebas de Conformidad. En el caso particular de la Máquinas de Coordenadas, el tema es polémico; sin embargo en esta investigación se le da el significado exacto y obliga a definir valor, signo y posición de errores, y si fuera el caso orientación.

Trazabilidad: Característica de la calibración de un instrumento de medición, que manifiesta que se determino por una cadena ininterrumpida de comparaciones con instrumentos y/o patrones de mayor jerarquía, hasta el patron primario internacional de esa magnitud

Nota: La importancia de la trazabilidad es tal, que su costo llega a sobrepasar al del instrumento

Evaluación metroológica: Comprobación del cumplimiento de especificaciones de exactitud, de operación u otros aspectos importantes de operación de un instrumento de medición. Una carta de calibración no es necesaria para una evaluación metroológica, pues no es lo mismo determinar que satisface tolerancias, a determinar la magnitud y posición de desvíos

A.3 TÉRMINOS USUALES QUE NO PERTENECEN AL VOCABULARIO METROLÓGICO LEGAL:

Accuracy verification, Performance Evaluation, Checking, Pruebas de Conformidad o similares, son términos que emplean diferentes normas o procedimientos para comprobar el cumplimiento de tolerancias de exactitud ofrecidas por un fabricante, o definir bandas de incertidumbre de medición, para un intervalo de confianza establecido

Certificación El concepto de Certificación, es actualmente ambiguo, pues en algunas ocasiones se aplica a instrumentos, o en otras a procesos, y en otras mas a personas o instituciones, pero es necesario anotar que los certificados no revelan exactamente las propiedades de exactitud de tales instrumentos procesos o personas. En la actualidad, el software de aplicaciones metroológicas esta siendo objeto de certificación en la Comunidad Europea, como condición para ser comercializado. La dirección General de Normas de la SECOFI, argumenta que es la única que puede *certificar*, o emitir *certificados*, pero carece de la capacidad técnica y científica

A.4 SIGLAS FRECUENTEMENTE USADAS EN EL VALCABULARIO METROLÓGICO:

- ANSI** American National Standards Institute 11 West 42 nd. Street floor US-N4, Nueva York N Y USA.
Produjo la primera norma de MMCs
- ASPE** American Society for Precision Engineering Wildwood 225, Ave., Unit B, Woburn, MA 01811 USA
Socios realizan investigación de frontera en el tema.
- BIPM** Bureau Internationale des Poids et Mesures. Pavillon de Breteuil, F-92312 Sevres Cedex, France
México es miembro.
- CEM** Centro Español de Metrología Madrid, España Laboratorio Primario.
México tiene acuerdos de colaboración.
- CENAM** Centro Nacional de Metrología Km 4,5 Los Cues Municipio El Marques, Queretaro Mexico
Ya definidas sus funciones en capitulo primero.
- DGN** Direccion General de Normas, Mexico Av Puente de Tecamachalco N. 6. Mexico D.F. Mexico
- DIN** Deutscher Institut für Normung (Instituto de Normalizacion Alemán)
Realizó normas muy usadas para cálculos de incertidumbre.
- DKD** Deutscher Kalibrier Dienst (Sistema de Calibracion Aleman)
Frecuentemente se toman sus veredictos como válidos en México
- EUSPE** European Society for Precision Engineering Division Systems Mécaniques Université de Technologie de Compiègne 60206 Compiègne, Cedex France
Socios realizan investigación de frontera en el tema.
- ISO** International Standardization Organization, Case Postale 56, CH 1211 Geneva Switzerland
- ISO-GUM** Guide for Uncertainty Measurement (Guia ISO para el cálculo de Incertidumbres)
- IMEKO** International Measurement Confederation P.O. Box 457, H-1371 Budapest 5, Hungary. México a través de SOMI es miembro.

- IMGC** Instituto di Metrologia Gustavo Colonnetti Consiglio Nazionale delle Ricerche Torino Italy Laboratorio Primario de Italia
México tiene acuerdos de colaboración y transferencia de tecnología
- InMetro.** Laboratorio Primario de Metrologia Brasil Relaciones con México
- INTI** Instituto Nacional de Tecnología Industrial Buenos Aires Argentina.
Laboratorios primarios de Argentina México tiene acuerdos
- JSPE** Japanesse Society for Precision Engineering Department of Precision Engineering, Osaka University, Suita, Asaka 565, Japan
Socios realizan investigación de frontera en el tema
- NIST.** National Institute of Standards and Technology Gaitesburgh 20899, MD.
And 20234, Washington D C USA
Laboratorio regional para America en aspectos de comercio por acuerdos comerciales privados
- NPL.** National Physical Laboratory (Laboratorio Primario del Reino Unido)
- NRLM** National Research Laboratory of Metrology Minister of Industry and Trade of Japan Laboratorios Primarios de Japon
Acuerdos con Mexico becarios mexicanos en cursos
- PTB** Physikalisch Technische Bundesanstalt (Instituto Federal Fisicotecnico, Alemania), Bundesallee 100, Braunschweig, Germany
Acuerdos con México Becarios mexicanos, transfiere y ofrece la trazabilidad Internacional a Mexico
- VDE** Verband Deutsche Elektrotechniker (Federacion Electrotécnica Alemana)
Coautores de la norma VDI/VDE 2617
- VDI** Verein Deutscher Ingenieure (Asociacion Alemana de Ingenieros)
Coautores de la norma VDI/VDE 2617 de Máquinas de Coordenadas

APÉNDICE B

DISCUSIÓN DE LOS PRINCIPALES PROCESOS NORMALIZADOS DE VERIFICACIÓN Y DIAGNÓSTICO DE MAQUINAS MULTIEJE.

B.1 ANSI/ASME B98.1.12M-1985 Methods for Performance Evaluation of Coordinate Measuring Machines. An American Standard [11].

El origen de esta norma se localiza entre usuarios de MMCs, quienes advirtieron sobre distintos errores intrínsecos, extrínsecos y de uso a que se ven expuestas las mediciones en MMCs. Inicialmente fue a través de ASME, que se propuso esta recomendación (mas no norma), a fin de empezar a establecer criterios de validación y deslinde de responsabilidades por la exactitud de las máquinas. Posteriormente el gobierno de los Estados Unidos, en base a los esfuerzos previos de ASME, así como con las recomendaciones de expertos, generaron la ANSI B.89 1.12M

Las principales partes de esta norma son

Enfoque (Scope) de la norma. La *norma* inicia haciendo comentarios acerca de la sensibilidad de MMCs a variables ambientales y de formas de uso como variación de longitud de escalas por temperatura, diferente comportamiento de la MMC por variaciones de voltaje o de suministro de aire a presión, o repetibilidad de palpado por vibraciones, continua estableciendo definiciones de error, palpador, tipos de palpadores, tipos de MMCs, coeficiente de dilatación térmica, etc. Dentro de esta introducción recomienda formatos de registro de resultados de pruebas y de variaciones ambientales.

Entre estos criterios, establece que cuando los modos de operación de las MMCs requieren de computadoras para procesar datos numéricos, en sus formas normales de operación estas deben considerarse parte del instrumento, y los errores del software deben considerarse parte de los errores totales. Similares criterios establece para la influencia de errores ambientales y modos de operación, de tal manera que se avalúan directamente la máquina e indirectamente las condiciones y modos de operación. Recomienda que cuando se dan situaciones de no cumplimiento de tolerancias se midan vibraciones, temperatura y estabilidad de aire por separado para liberar a proveedores de responsabilidades si fuera el caso.

Especial énfasis establece para la interpretación de Exactitud (parte 5.4), expresado éste como la banda total de variabilidad de una medida, **no importa cuanto se**

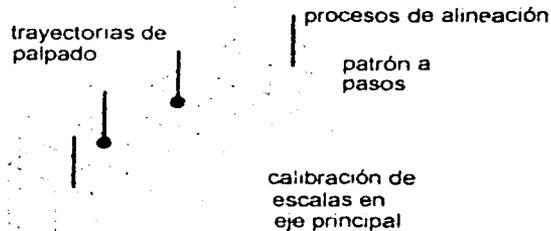
aleje el valor medio de medidas del valor verdadero, lo cual desde nuestro punto de vista es una inconsistencia

Los principios geométricos en que se basa son a) la correcta medición de longitud que debe reportar en cualquier dirección, ya sea a lo largo de ejes alineados, en direcciones no paralelas a los ejes, ya sea en intervalos cortos de longitud, o en intervalos grandes, y b) en la repetibilidad de vectores reportados para idénticas posiciones

Para a) propone tres instrumentos básicos

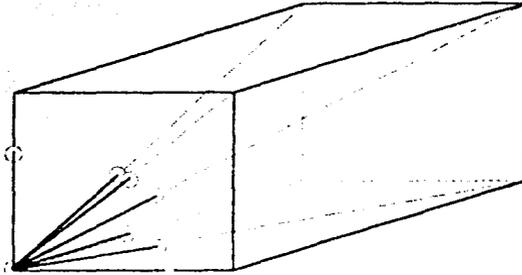
a.1 Medición de longitudes a lo largo de ejes por medio de interferómetro láser (ver Principios de metrología geométrica usados en la actualidad, y figuras 1.20 y 1.21).

a.2 Medición de longitudes por patrones de longitud a pasos. Consiste esta prueba en alinear tal patrón a pasos a lo largo de los ejes principales de la MMC y efectuar las mediciones



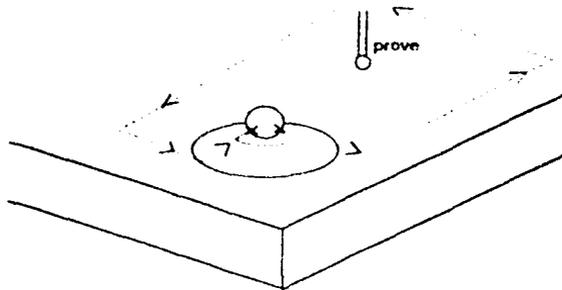
En ambos casos se presupone la correcta alineación de ejes ópticos de láser y de patrones a pasos. Para ambas pruebas, la información extraída es insuficiente, pues errores de escuadria y de rectitud quedan enmascarados, por lo que los resultados de mediciones se verán alterados cuando se tenga que explotar algún atributo de la MMC sensible a estos parámetros

a.3. Medición de distancias entre esferas localizadas en barras. (Ball bars). Esta prueba consiste en medir la distancia entre esferas de barras, colocadas en cada una de las esquinas del cubo de medición, para todas las localizaciones y orientaciones principales: a lo largo de x, a lo largo de y, a lo largo de z, en los planos x, y de x^0, y^0 a x^1, y^1 , de x^2, y^2 a x^3, y^3 , de x^4, y^4 a x^5, y^5 a x^6, y^6 , x^7, y^7 a x^8, y^8 , así respectivamente en planos Y, Z y en el volumen X, Y, Z



Para llevar a cabo estas pruebas propone la construcción de patrones de longitud de esferas, con ajustes de longitud, y de accesorios de montaje de barras para distintas orientaciones. Propone también el uso de sockets para medir de forma continua alrededor de esferas pivote

Para b), repetibilidad de posiciones, propone dos pruebas el sembrado de conos para fijación de barras en vez de palpadores, y la medición de centros de esfera ancladas a mesa de medición



Como resultado de esta prueba se obtienen cartas de desvío de medidas, las que no deben tener una banda mas amplia que la clase de calidad del instrumento. No se obtiene de esta prueba información alguna sobre el tipo de errores fuente ni maneras de corregirlo.

Comentarios de la B.89.1.12M:

Ventajas: La principal consiste en la explotación de la invariabilidad de tamaño de barras para descubrir fallas de operación en la MMC, ya que si hubiera errores de ortogonalidad, éstos se descubrirían al cambiar de orientación las barras; así como de rectitud o cabeceos.

Desventajas:

Comprometen a los usuarios al desarrollo de accesorios (sockets) que difícilmente podrán realizar, y que no son estrictamente indispensables para la ejecución de las pruebas

No advierten a usuarios lo incompleto de las pruebas con láser y con patrones a pasos

No permiten descubrir desalineamientos de mecanismos contra mesa

No permiten descubrir errores de esféricidad de palpadores, ni de umbrales de validación para recorridos en diferentes ejes o diferentes direcciones

Puede darse el caso de medidas muy repetibles y muy sesgadas de los valores verdaderos y sin embargo los resultados reporten cumplimiento de tolerancias

B.2 VDI/VDE 2617 Blatt 2.1 (patre 2.1) [12].

Es la norma que usualmente se emplea en Alemania, y fue propuesta por asociaciones de ingenieros. Básicamente coincide con otras en el sentido de que explota la invariabilidad de tamaño de patrones independientemente de su orientación, para poner a prueba MMC's

Inicialmente establece el criterio de incertidumbre, como la región donde se encuentran los desvíos de longitud respecto de sus valores verdaderos, y no deber ser rebasados según un parámetro de calidad expresado ordinariamente por una campana o ecuación

$$L'95 \leq \pm \{ 2.5 + 1/250 \} [im, mm]$$

Y se interpreta, el desvío de una medida de L longitud debe ser menor a debe ser menor a (Inecuación) para un intervalo de confianza de 95 %

Establece que las mediciones de longitud han de realizarse alrededor del centro de mediciones, para planos principales, y tridimensionalmente. Advierte sobre

probables problemas que pueden presentarse si no se alinean los patrones de medición.

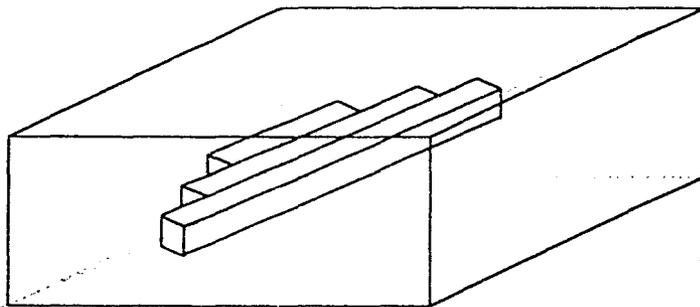
Básicamente provee un criterio de aceptación o rechazo de MMCs, pero no provee mayor información para corrección o para elección de regiones óptimas de medición, ni para predicción de comportamiento

Al igual que la B 89, no atiende los aspectos de rectitud, ortogonalidad, paralelismo de mesa con mecanismos, esféricidad de palpador, o umbrales de palpación. No provee información de errores fuente

B.3 CMMA. Accuracy Specification for Coordinate Measuring Machines of Coordinate Measuring Machines Manufacturers Association [13].

En esta norma, inicialmente se hace una explicación acerca de los distintos errores que se pueden encontrar en una MMC (errores fuente), pero al igual que B.89 o que VDI/VDA, no proporciona criterios para evaluarlos directamente, ni criterios geométricos matemáticos para deducirlos

Al llevar a cabo las pruebas propone la localización de patrones de longitud en el seno del volumen de medición para orientaciones principales y para medidas diagonales 3D



Finalmente se cae en la calificación de aceptación o rechazo de la MMC de acuerdo a la población de puntos medidos fuera de la campana.

$$U95 \leq \{2.5 + L/250\} \text{ [}\mu\text{m, mm]} \text{ (u otros valores)}$$

Posee básicamente las mismas desventajas de B 89.1 y de VDI/VDA.

B.4 Measurement Uncertainty on Coordinate Measuring Machines, Of the Swiss Federal Institute of Technology [14].

Esta norma (recomendación oficial), se basa en el diagnóstico de las MMCs en base a los resultados de medidas de circularidad de discos o anillos localizados, en diferentes direcciones y orientaciones dentro del volumen de medición de las MMCs

Dentro de los criterios de diagnóstico explica como una elipse para los resultados de medición de un disco colocado planarmente, revelaría errores de escala para uno de los ejes involucrados, revelaría errores de escuadría para una elipse con su eje mayor inclinado, y revelaría errores de palpadores al medir el objeto complementario (disco - anillo)

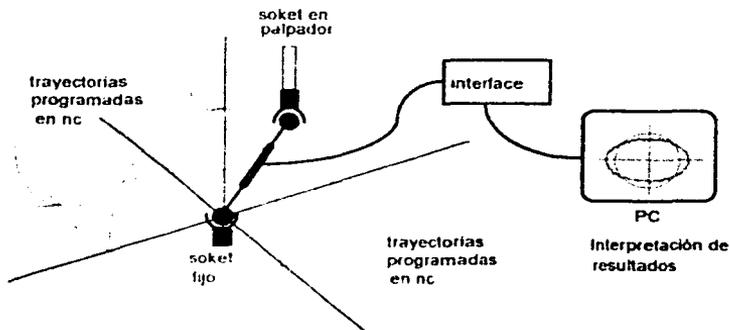
Para la ejecución de pruebas recomienda la fabricación de anillos o discos en taller, los cuales se estima, tendrían la suficiente circularidad que permita descubrir tales errores. Las pruebas se basan en la invariabilidad del disco o anillo, y las pruebas reflejan desviaciones relativas respecto a una medida unitaria (el diametro del disco)

Ventajas: Las pruebas efectuadas permiten calificar la aceptación o rechazo de la MMC, además permiten aproximarse a los probables errores fuente de primer orden de la MMC

Desventajas: Dado que los intervalos en que descubre errores se limita al diametro de patrones, se requeriría de grandes discos o anillos para máquinas grandes. Puede confundir en la interpretación de resultados, pues hay combinaciones que producen idénticos resultados con diferentes errores fuente como los diferentes umbrales de palpación en x e y; puede llevar a la interpretación errónea de errores de escala para algunos de los ejes. Aunque los autores (Knapp) afirman permite descubrir todos los errores fuente, no explica como. **No propone ningún método o principio de interpretación cuantitativa.**

B.5 Renishaw Ball Barr Tester. Es un instrumento y método de diagnóstico desarrollado por Renishaw (fabricante de palpadores de MMCs), que se basa en la determinación de variaciones de distancia entre una esfera viajera y una esfera fija (en un socket), por medio de un transductor (barra de longitud variable) y un sistema captador de datos. Es una variación de la recomendación suiza, solo que a esta última se le ha integrado software no público de interpretación de datos. Como

resultados provee la calificación dentro ó fuera de tolerancia de la MMC, errores de escala y errores de ortogonalidad



Es necesario aclarar que la distinción de errores escala ortogonalidad son una aproximación de solución de un sistema lineal, tal solución generalmente no coincide si se realizan pruebas directas de longitud, escala, ortogonalidad cabeceo (ver capítulo 1) directamente, o si se aumentan o cambian las muestras de medición. Errores de rectitud ó cabeceo (no lineales) no los puede diagnosticar.

B.6 Comparison of different artefacts for interim coordinate measuring machine checking, from the Swiss Standards Committee

Cabe mencionar este reporte como un resumen de los distintos procesos de evaluación de MMCs, que permite comparar principios de calibración, procesos, patrones requeridos, nivel de calidad requerido de estos últimos, maneras de llevar a cabo las pruebas, y finalmente resultados que pueden obtenerse (cuantificación de 21 errores fuente). Para la determinación de todos ellos el autor establece que se pueden determinar indirectamente con medición de longitud, medición de circularidad (ya reportado el principio), medición de distancia de bolas en barras, medición de posiciones de centros de bolas u orificios en barras.

Respecto a las expectativas que Knapp y el comité establece tenemos que decir lo siguiente

Probablemente sus expectativas de diagnóstico fino las basa en un análisis algebraico que no discute ni cita. A este respecto permitásenos discrepar rotundamente de sus criterios, pues establece que la determinación de errores de ortogonalidad tanto como de *roll* (giro perpendicular al eje que se

recorre), se pueden determinar con 45 medidas de longitud con bloques patrón. Lo cual en el primer caso es demasiado, pues **un sistema lineal que resuelva ortogonalidad requiere de mucho menos medidas**, y en el segundo caso recordemos que el *roll* es una propiedad continuamente variable a lo largo de un eje. De donde saca que con 45 indirectas de longitud medidas queda definido este error? Similares afirmaciones plagan este artículo.

No existe (cuando menos para conocimiento nuestro) proceso en la literatura, donde para un número fijo de medida indirectas se pueda obtener la solución de un modelo no lineal. No se ha ofertado software de diagnóstico de MMCs en base a esos procesos indirectos. Aunque existen modelos propuestos de propagación de error punto a punto, no existe públicamente y dudamos que existan internamente procesos inversos de solución, para obtener errores fuente no lineales a partir de medidas indirectas tan simples como longitud. (recomendamos consultar capítulo 3)

Conclusiones de Apéndice B.

Excepcionando los procesos Renishaw y el resumen del Swiss Committee, el resto de procesos parecen estar dedicados a cualquier tipo de usuarios de la industria en general, y para los cuales es necesario llamar su atención acerca de los distintos modos de cometer errores una MMC o en un proceso de medición tridimensional. Por lo mismo estas normas no están dedicadas a un diagnóstico más fino de las MMCs, sino más bien a una aceptación o rechazo. Para investigadores que se han dedicado más profundamente al análisis de MMCs, ya sea para la mejora de su diseño, ya sea para la creación de software de corrección, ya sea para el software de diagnóstico, estas *normas* son simplemente insuficientes, y muy primitivas. En cuanto a la utilidad el proceso Renishaw, se requiere que la MMC por diagnosticar permita sustituir sockets en lugar de palpadores y pueda realizar viajes circulares por NC, en ese supuesto la prueba permite descubrir los desvíos de la circularidad, sin embargo, la mayoría de MMCs no garantizan trayectorias circulares, y no por ello se pueda presumir que los puntos salida-llegada en una trayectoria (la mayoría de veces en línea recta) estén fuera de tolerancia. Finalmente El reporte del Swiss Committee parece haberse emitido para científicos que a partir de él se puedan dedicar al desarrollo de métodos de prueba para descubrir los errores fuente. Finalmente parece que las tres primeras normas fueron emitidas para las necesidades más elementales del comercio de MMCs pero no más que eso.

Por lo que se refiere a la normalización nacional, debe anotarse que existe un vacío normativo medición y calibración 3D en todos sentidos, llevando en la práctica a los peritos auditores de MMCs a satisfacer las necesidades de acreditamiento de industrias cuando los errores endógenos de MMCs o de operación, no son graves para los parámetros de control de calidad en que estas se emplean.

BIBLIOGRAFÍA

REFERENCIAS MENCIONADAS EN ESTA TESIS.

1. Foundations of Mechanical Accuracy Wayne R. Moore. The Moore Special Tool Company 1970
2. Bernard Ribémont La Edad Media y la Simbología de los Números. Mundo Científico, N. 161, V. 15, 1995 pp 816 - 821
3. Bernard Ribemont La Revolución Aritmética de la Edad Media Mundo Científico, N. 161, V. 15, 1995 pp 822 - 828
4. Precision Machine Design Alexander H. Slocum Massachusetts Institute of Technology Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ
5. Modelling the errors of multi-axis machines a general methodology J. A. Soons, F. C. Theuws, and P. H. Schellekens. Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands. PRECISION ENGINEERING January 1992, vol 14, n 1
6. Manual de aplicaciones del sistema Laser 5528 HP
7. Numerical Recipes in C, University of Cambridge Press, London
8. Modelling Geometric Michael E. Mortenson John Wiley & Sons, NY 1985.
9. Hartig Et. Al Traceability of coordinate measuring machines according to the virtual CMM concept 5 th IMEKO Dimensional Metrology Symposium. 25-27 October 1995, Zaragoza Spain. Proceedings. 245-253
10. Sanchez Jose, et al Evaluating Masters and Procedures of Calibration with non Linear Computational Mechanisms XIV IMEKO World Congress 1-6 June Tampere Finland, 1997, Proceedings. 129-134
11. Methods for Performance Evaluation of Coordinate Measuring Machines An American Standard ANSI/ASME B98.1 12M-1985
12. Accuracy of Coordinate measuring Machines. Characteristic Parameters Measuring Checking. VDI/VDE 2617 Blatt 2 1, Dec. 1986.

13. "CMMA" Accuracy s VDI/VDE 2617 Blatt 2 1ecification for Coordinate Measuring Machines.
14. Comparison of different artefacts for interim coordinate measuring machine checking: a report from the Swiss Standards Committee

REFERENCIAS RELEVANTES EN ESTA LINEA DE INVESTIGACIÓN

15. **ISO Standards Machine Tools. Standards Handbook 5.**
16. **PREDICTION OF POSITIONAL ERRORS OF A THREE AXIS MACHINE TOOL USING A NEURAL NETWORK**
Narayan Srinivasa, John C. Ziegert, and Scott Smith
Department of Mechanical Engineering, University of Florida, Gainesville, Florida
APAN/USA Symposium on Flexible Automation - Vol 1 ASME 1992
17. **A statistical analysis of positional errors of a multiaxis machine tools**
Y. C. Shin and Y. Weir*
*School of Mechanical Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN, and Department of Industrial and Management Systems Engineering, The Pennsylvania State University, University Park, PA, USA
PRECISION ENGINEERING, JULY 1992, VOL 14, N 3.
18. **THE EFFECT OF THERMAL EXPANSION AND POSITIONING MEASURING SYSTEM ON THE ACCURACY OF MACHINE TOOLS**
P. Oksanen, S.J. Forsman and P.H. Andersson
Institute of Production Engineering, Tampere University of Technology, Tampere, Finland
Metrology for Quality Control in Production, PROCEEDINGS September, 8 - 10, 1998 Vienna, Austria

- 19 **RESEARCH INTO ROTATIONAL ERRORS OF A COORDINATE MEASURING MACHINE TABLE**
A. Ryniewicz, M. Kowalski, J. Gawlik and J. Rewilak
Department of Production Engineering,
Cracow University of Technology, Al Jana Pawla II 37, 31-864 Krakow, Poland
Metrology for Quality Control in Production, PROCEEDINGS
September, 8 – 10, 1998 Vienna, Austria
- 20 **Development of a System for Measuring Dimensions Based on the Detection of Positional Vectors and Normal Vectors**
Hideki AOYAMA, Takeshi KISHINAMI, Katsumasa SAITO and Masaharu KAWAI

JSPE, MAY 1991, VOL 57, N 5
- 21 **Evaluation of Coordinate Measuring Machines Performance using design of experiments**
A. Piratelli-Filho 1, B. D. Giacomo 2
1 University of Brasilia, Faculty of Technology, Dept Mechanical Engineering, Brazil, pirateli@unb.br 2 University of São Paulo, Engineering School of São Carlos, Dept Mechanical Engineering, Brazil bgiacomo@sc.usp.br
Metrology for Quality Control in Production, PROCEEDINGS
September, 8 – 10, 1998 Vienna, Austria
- 22 **A new damper design for machine tool structures: the replicated internal viscous damper**
Alexander H. Slocum, Eric R. Marsh, and Douglas H. Smith, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA

PRECISION ENGINEERING, JULY 1994 VOL 16, N 3.
- 23 **ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF TOLERANCES ON ROBOT PRECISION**
D.M. Tokoran
Universitatea de Nord Baia-Mare Romania
Metrology for Quality Control in Production, PROCEEDINGS
September, 8 – 10, 1998 Vienna, Austria

24

ACTIVE ERROR COMPENSATION FOR PRECISE MACHINES

R. Bansevicius 1, V. Giniotis 2 and J. Knight 3

1 Kaunas University of Technology, Kestucio 37, 3004 Kaunas, Lithuania

2 Vilnius Gediminas Technical University, 2038 Vilnius, Lithuania

3 De Montfort University, The Gateway Leicester, UK

**IMEKO 2000, XVI World Congress, Proceedings
September 25-28, 2000 Austria Vienna**

25

TRAINING CONCEPT FOR COORDINATE MEASUREMENT

A. Weckenmann, R. Rothmeier and M. Kriemer

Chair Quality Management and Manufacturing Metrology
University Erlangen-Nuremberg, D-91054 Erlangen, Germany

**IMEKO 2000, XVI World Congress, Proceedings
September 25-28, 2000 Austria Vienna**