

MEMORIA

ENSAYOS Y ANÁLISIS DE LAS PRESTACIONES DE UN ROBOT INDUSTRIAL DE SEIS EJES SEGÚN LA NORMA UNE-EN ISO 9283



Escuela **U**niversitaria
de **I**ngeniería **T**écnica
Industrial de **Z**aragoza

AUTOR: HÉCTOR PARDO FUENTELESAZ

DIRECTORES: FRANCISCO JAVIER BROSED DUESO

JORGE SANTOLARIA MAZO

ESPECIALIDAD: MECÁNICA

CONVOCATORIA: DICIEMBRE 2010

ÍNDICE

	Páginas
1) OBJETO Y ALCANCE DEL PROYECTO.....	1
2) NORMA ESPAÑOLA UNE-EN ISO 9283.....	2
2.1) Antecedentes.....	3
2.2) Declaración.....	3
3) CONDICIONES DE LOS ENSAYOS.....	4
3.1) Montaje del robot.....	4
3.2) Condiciones anteriores al ensayo.....	4
3.3) Condiciones de uso y condiciones ambientales.....	4
3.3.1) Condiciones de uso.....	4
3.3.2) Condiciones ambientales.....	4
3.4) Principios de medida de desplazamientos.....	5
3.5) Instrumentación.....	5
3.6) Carga del interfaz mecánico.....	6
3.7) Velocidad de ensayo.....	7
3.8) Definición de las posiciones a ensayar y las trayectorias a seguir.....	8
3.8.1) Objetivo.....	8
3.8.2) Ubicación del cubo en el espacio de trabajo.....	8
3.8.3) Ubicación de los planos a utilizar dentro del cubo.....	9
3.8.4) Posiciones a comprobar.....	10
3.8.5) Requisitos de movimiento.....	12
3.8.6) Trayectorias a seguir.....	12
3.9) Número de ciclos.....	14
3.10) Procedimiento de los ensayos.....	14
3.11) Características a ensayar. Aplicaciones.....	15

4) TIPOS DE ENSAYOS.....	16
4.1) Características de posición.....	16
4.1.1) Descripción general.....	16
4.1.2) Precisión de posición y repetibilidad de posición.....	17
4.1.3) Precisión de distancia y repetibilidad de distancia.....	24
4.1.4) Tiempo de estabilización de posición.....	30
4.1.5) Rebose de posición.....	31
4.1.6) Deriva de las características de posición.....	32
4.1.7) Intercambiabilidad.....	35
4.2) Características de la trayectoria.....	36
4.2.1) Generalidades.....	36
4.2.2) Precisión de la trayectoria.....	37
4.2.3) Repetibilidad de la trayectoria.....	39
4.2.4) Precisión de la trayectoria en la reorientación.....	40
4.2.5) Desviaciones en esquina.....	42
4.2.6) Características de la velocidad en la trayectoria.....	45
4.3) Tiempo mínimo de posicionamiento.....	48
4.4) Comportamiento estático.....	50
4.5) Criterios de comportamiento en aplicaciones específicas.....	50
4.5.1) Desviaciones de ensayo ondulante/ de ondulación.....	50
5) PROGRAMACIÓN DE MOVIMIENTO.....	53
5.1) Utilización de diferentes sistemas de coordenadas.....	53
5.2) Movimientos punto a punto (PTP).....	61
5.2.1) General (PTP sincrónico).....	61
5.2.2) Perfil de marcha más elevado.....	62
5.2.3) Instrucciones de movimiento.....	62
5.3) Movimientos sobre trayectorias.....	69

5.3.1) Velocidad y aceleración.....	69
5.3.2) Control de orientación.....	71
5.3.3) Movimientos lineales.....	75
5.3.4) Movimientos circulares.....	75
5.4) Procesamiento en avance.....	76
5.5) Movimientos con posicionamiento aproximado.....	79
5.5.1) Aproximación PTP - PTP.....	80
5.5.2) Aproximación LIN - LIN.....	81
5.5.3) Aproximación CIRC - CIRC y aproximación CIRC - LIN.....	83
5.5.4) Aproximación PTP - trayectoria.....	84
5.5.5) Posicionamiento aproximado mejorado.....	85
5.5.6) Cambio de herramienta con posicionamiento aproximado.....	86
5.6) Programación por aprendizaje de los puntos.....	86
5.7) Parámetros de movimiento.....	87
6) DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE.....	88
6.1) Instrumentos empleados para el montaje.....	88
6.2) Preparación del Montaje.....	92
7) OBTENCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS.....	95
7.1) Precisión de posición y repetibilidad de posición.....	96
7.1.1) Precisión de posición.....	97
7.1.2) Repetibilidad de posición.....	99
7.1.3) Variación multidireccional de la precisión de posición.....	102
7.2) Precisión de distancia y repetibilidad de distancia.....	108
7.2.1) Precisión en la distancia.....	108
7.2.2) Repetibilidad en la distancia.....	111
7.3) Precisión de la trayectoria.....	111
7.4) Repetibilidad de la trayectoria.....	115

8) TABLA DE RESULTADOS.....	118
9) CONCLUSIONES.....	120
10) ANEXOS.....	121
11) BIBLIOGRAFÍA.....	122

1) OBJETO Y ALCANCE DEL PROYECTO

El objeto del proyecto enunciado consiste en el análisis de las prestaciones de un robot de seis ejes según la NORMA UNE-EN ISO 9283. Por lo que se realizan los ensayos que recoge la norma mencionada anteriormente para su posterior evaluación. Con este estudio se pretende verificar el comportamiento de un robot de seis ejes mientras está operando y poder conocer los errores que comete.

Es un proyecto propuesto por el departamento de ingeniería de diseño y fabricación que se mueve en el ámbito de la metrología dimensional y con él, se pretende evaluar los errores que comete un robot de seis ejes cuando está operando.

Este estudio lo que hace ver, es que hay robots muy precisos, pero que no llegan a ser del todo exactos. De ahí, que se hagan estudios como este para poder mejorar y corregir dichos errores.

2) NORMA ESPAÑOLA UNE-EN ISO 9283

La norma EN-ISO 9283 Robots manipuladores industriales– Criterios de análisis de prestaciones y métodos de prueba relacionados.

Su fin último es facilitar el entendimiento entre usuarios y fabricantes de robots y sistemas robóticos así como servir de herramienta para determinar el estado de un robot a partir de unos indicadores bien definidos. Con estos datos se puede elegir el robot más adecuado mediante un análisis riguroso de sus capacidades técnicas.

La norma proporciona también herramientas para el mantenimiento preventivo de los equipos. Realizando comprobaciones periódicas de ciertos parámetros, definiendo una tolerancia adecuada de éstos y teniendo en cuenta la aplicación que lleva a cabo el robot, es posible conocer su deriva y, por lo tanto, los cambios sufridos por el elemento productivo. Gracias a esta norma es posible cumplir los requisitos del apartado 4.1 de la nueva ISO 9000:2001, que demanda disponer de recursos para realizar un seguimiento y medir y analizar los procesos productivos para alcanzar los resultados planificados y su mejora continua. Puesto que en las modernas líneas de producción los robots son parte muy destacada, es imprescindible tener datos precisos de su estado para desarrollar una tarea determinada.

La norma ISO 9283 homogeniza los parámetros a analizar y da indicaciones de cómo obtenerlos. Así pues, tiene una aplicación clara en el momento de la adquisición de los equipos y durante todo su ciclo de vida en la línea de producción. Contempla también una serie de pruebas estandarizadas, que deben realizarse sobre cada robot con el fin de determinar su capacidad para desarrollar una tarea determinada.

Esta norma europea ha sido aprobada por CEN el 27-02-1998. Los miembros de CEN están sometidos al Reglamento Interior de CEN/CENELEC que define las condiciones dentro de las cuales debe adoptarse, sin modificación, la norma europea como norma nacional.

Las correspondientes listas actualizadas y las referencias bibliográficas relativas a estas normas nacionales, pueden obtenerse en la Secretaría Central de CEN, o a través de sus miembros.

Esta norma europea existe en tres versiones oficiales (alemán, francés e inglés). Una versión en otra lengua realizada bajo la responsabilidad de un miembro de CEN en su idioma nacional, y notificada a la Secretaría Central, tiene el mismo rango que aquéllas.

Los miembros de CEN son los organismos nacionales de normalización de los siguientes países: Alemania, Austria, Bélgica, Dinamarca, España, Finlandia, Francia, Grecia, Irlanda, Islandia, Italia, Luxemburgo, Noruega, Países Bajos, Portugal, Reino Unido, República Checa, Suecia y Suiza.

2.1) ANTECEDENTES

El Texto de la Norma Internacional ISO 9283:1998 ha sido elaborado por el Comité Técnico ISO/TC 184 *Sistemas de automatización industrial e integración* en colaboración con el Comité Técnico CEN/TC 310 *Tecnologías avanzadas de fabricación*, cuya Secretaría está desempeñada por BSI.

Esta norma europea anula y sustituye a la Norma EN 29283:1992.

Esta norma europea deberá recibir el rango de norma nacional mediante la publicación de un texto idéntico a la misma o mediante ratificación antes de finales de octubre de 1998, y todas las normas nacionales técnicamente divergentes deberán anularse antes de finales de octubre de 1998.

De acuerdo con el Reglamento Interior de CEN/CENELEC, están obligados a adoptar esta norma europea los organismos de normalización de los siguientes países: Alemania, Austria, Bélgica, Dinamarca, España, Finlandia, Francia, Grecia, Irlanda, Islandia, Italia, Luxemburgo, Noruega, Países Bajos, Portugal, Reino Unido, República Checa, Suecia y Suiza.

2.2) DECLARACIÓN

El texto de la Norma Internacional ISO 9283:1998 ha sido aprobada por CEN como norma europea sin ninguna modificación.

3) CONDICIONES DE LOS ENSAYOS

3.1) MONTAJE DEL ROBOT

El robot debe montarse de acuerdo a las recomendaciones del fabricante.

3.2) CONDICIONES ANTERIORES AL ENSAYO

El robot debe estar completamente montado y operacional. Se deben haber completado satisfactoriamente todas las operaciones de nivelado, procedimientos de alineación y demás ensayos de funcionamiento.

Los ensayos deben venir precedidos por un adecuado pre-calentamiento si así lo especifica el fabricante, excepto para el ensayo de deriva de posicionamiento que debe iniciarse en frío.

Si el robot tiene capacidad de ser ajustado por parte del usuario y este ajuste puede influir en las características a ensayar, o si las características ensayadas dependen de funciones específicas, la condición utilizada en el ensayo debe especificarse en el informe de resultados y debe mantenerse constante durante cada ensayo.

3.3) CONDICIONES DE USO Y CONDICIONES AMBIENTALES

3.3.1) Condiciones de uso

Las condiciones normales de uso utilizadas en los ensayos deben ser aquellas especificadas por el fabricante.

Las condiciones normales de uso incluyen, pero no están limitadas por, requisitos eléctricos, hidráulicos y neumáticos, fluctuaciones y alteraciones en la potencia así como los límites máximos de seguridad

3.3.2) Condiciones ambientales

3.3.2.1) Generalidades: Las condiciones ambientales utilizadas en los ensayos deben ser las especificadas por el fabricante, sujetas a los requerimientos del apartado 3.3.2.2.

Las condiciones ambientales incluyen temperatura, humedad relativa, campos electromagnéticos y electrostáticos, interferencias de radiofrecuencia, contaminación atmosférica, y altitud.

3.3.2.2) Temperatura de ensayo: La temperatura ambiental (Θ) durante el ensayo debe ser de 20 °C. La temperatura del ensayo debe mantenerse en:

$$(\Theta \pm 2) \text{ °C}$$

Tanto el robot como el instrumento de medida deberían haber estado en el entorno donde se va a realizar el ensayo durante el tiempo suficiente para que se establezca térmicamente antes del ensayo.

3.4) PRINCIPIOS DE MEDIDA DE DESPLAZAMIENTOS

Los datos de la posición y orientación medidos deben expresarse en el sistema de coordenadas de la base del robot, o en el sistema de coordenadas determinado por el equipo de medida.

Si las posiciones y trayectorias programadas en el robot están definidas en otro sistema de coordenadas diferente a las del instrumento de medida, los datos tienen que referirse a un sistema de coordenadas común. La relación entre los dos sistemas de coordenadas anteriores se debe establecer a partir de mediciones. Los puntos de referencia y los puntos medidos deberían estar dentro del cubo de ensayo y deberían estar lo más lejos uno del otro como sea posible.

Los puntos de medida deben encontrarse a la distancia de la interfaz mecánica especificada por el fabricante. La posición de este punto en el sistema de coordenadas de la interfaz mecánica debe guardarse.

La secuencia de rotación utilizada para calcular la desviación en la orientación debería ser tal que la orientación pueda ser continua en valor. Esto es independiente de si la rotación es sobre ejes en movimiento, o si es sobre ejes estacionarios.

3.5) INSTRUMENTACIÓN

Los equipos de medida utilizados para estos ensayos deben calibrarse y su incertidumbre de medida debe estimarse e indicarse en el informe del ensayo. Los siguientes parámetros se deberían tener en cuenta:

- Errores del instrumento
- Errores sistemáticos asociados al método utilizado
- Errores de cálculo

La incertidumbre total de la medida no debe exceder al 25% de la magnitud de la característica bajo ensayo.

3.6) CARGA DEL INTERFAZ MECÁNICO

Todos los ensayos se deben ejecutar con la masa, la posición del centro de gravedad, el momento de inercia, de acuerdo con las especificaciones del fabricante. Las condiciones de carga adecuadas deben especificarse en el informe de resultados.

Para caracterizar robots con comportamientos dependientes de la carga, se pueden realizar ensayos opcionales adicionales con la masa adecuada reducida al 10% o cualquier otro valor especificado por el fabricante.

Cuando una parte de la instrumentación de medida se fija al robot, su masa y posición debe considerarse como parte de la carga de ensayo.

El TCP (punto de referencia de la herramienta) es el punto de medida (MP) durante el ensayo. La posición del punto de medida debe especificarse en el informe de resultados.

La siguiente tabla muestra las cargas de ensayo:

Características a ensayar	Carga a utilizar	
	100% de la carga (X = obligatorio)	La masa de la carga reducida al 10% (O = opcional)
Precisión de posición y repetibilidad de posición	X	O
Variación multidireccional de la precisión de posición	X	O
Precisión de distancia y repetibilidad de distancia	X	-
Tiempo de estabilización de posición	X	O
Rebose de posición	X	O
Deriva de las características de posición	X	-
Intercambiabilidad	X	O
Precisión y repetibilidad en la trayectoria	X	O
Precisión en reorientación durante la trayectoria	X	O
Desviación en esquina	X	-
Características de velocidad en la trayectoria	X	O
Tiempo mínimo de posicionamiento	X	O
Comportamiento estático	X	
Desviación de ondulación	X	O

Tabla 3.1 - Cargas de ensayo

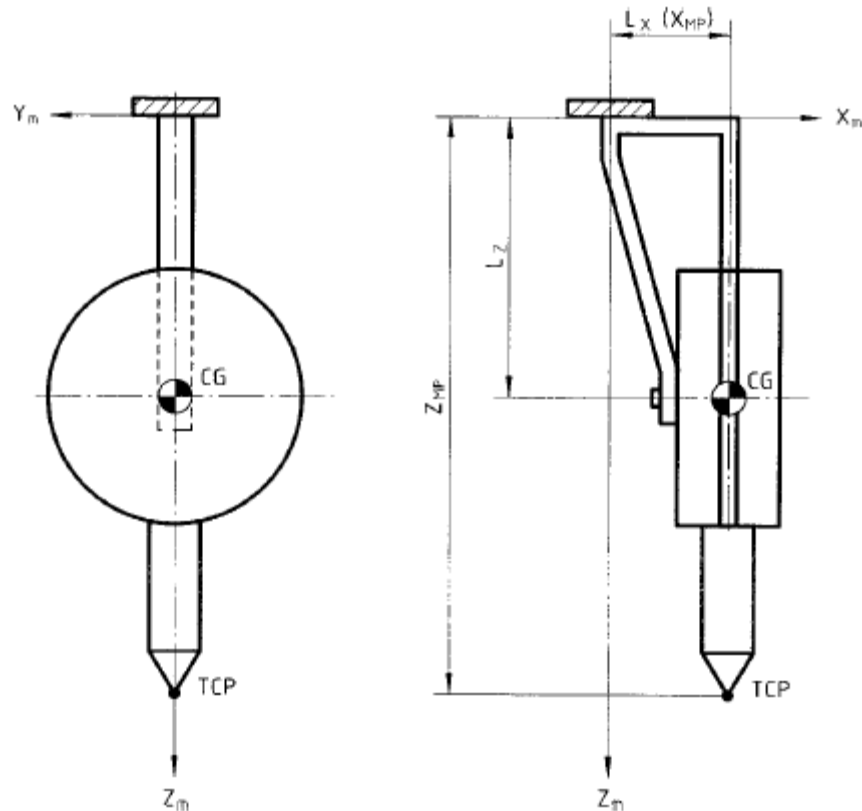


Fig. 3.1 - Ejemplo de elemento terminal de ensayo

3.7) VELOCIDAD DE ENSAYO

Todas las características de posición deben ensayarse a la máxima velocidad alcanzable entre las posiciones especificadas.

Para las características de trayectoria, los ensayos deben realizarse al 100%, 50% y 10% de la velocidad de trayectoria para cada una de las características comprobadas. La velocidad especificada en cada ensayo depende de la forma y el tamaño de la trayectoria. El robot debe ser capaz de alcanzar esta velocidad al menos en el 50% de la longitud de la trayectoria del ensayo.

Se debe informar si la velocidad se ha especificado en el modo punto a punto o modo de trayectoria continua, si esta opción es posible.

En las tablas 3.2 y 3.3 se resumen las velocidades del ensayo.

Características a ensayar	Velocidad	
	100% de la velocidad (X = obligatorio)	50% o 10% de la velocidad (O = opcional)
Precisión de posición y repetibilidad de posición	X	O
Variación multidireccional de la precisión de posición	X	O
Precisión de distancia y repetibilidad de distancia	X	O
Tiempo de estabilización de posición	X	O
Rebose de posición	X	O
Deriva de las características de posición	X	-
Intercambiabilidad	X	O
Tiempo mínimo de posicionamiento		

Tabla 3.2 - Velocidades del ensayo para las características de posición

Características a ensayar	Velocidad		
	100% de la velocidad (X = obligatorio)	50% de la velocidad (X = obligatorio)	10% de la velocidad (X = obligatorio)
Precisión y repetibilidad en la trayectoria	X	X	X
Precisión en reorientación durante la trayectoria	X	X	X
Desviación en esquina	X	X	X
Características de velocidad en la trayectoria	X	X	X
Desviación de ondulación	X	X	X

Tabla 3.3 - Velocidades del ensayo para las características de trayectoria

3.8) DEFINICIÓN DE LAS POSICIONES A ENSAYAR Y LAS TRAYECTORIAS A SEGUIR

3.8.1) Objetivo

Este apartado describe como se distribuyen adecuadamente cinco posiciones en un plano dentro de un cubo ubicado en el espacio de trabajo. También describe las trayectorias de ensayo que se tiene que seguir. Cuando los robots tienen un eje con un alcance menor que otro, se reemplaza el cubo por un rectángulo paralelepípedo.

3.8.2) Ubicación del cubo en el espacio de trabajo

En el espacio de trabajo se ubica un único cubo, las esquinas del cual se designan por C_1 a C_8 (véase figura 3.2), que cumpla los siguientes requerimientos:

- El cubo debe colocarse en aquella parte del espacio de trabajo en la que se prevea un uso mayor.

- El cubo debe tener el máximo volumen posible con sus lados paralelos al sistema de coordenadas de la base del robot.

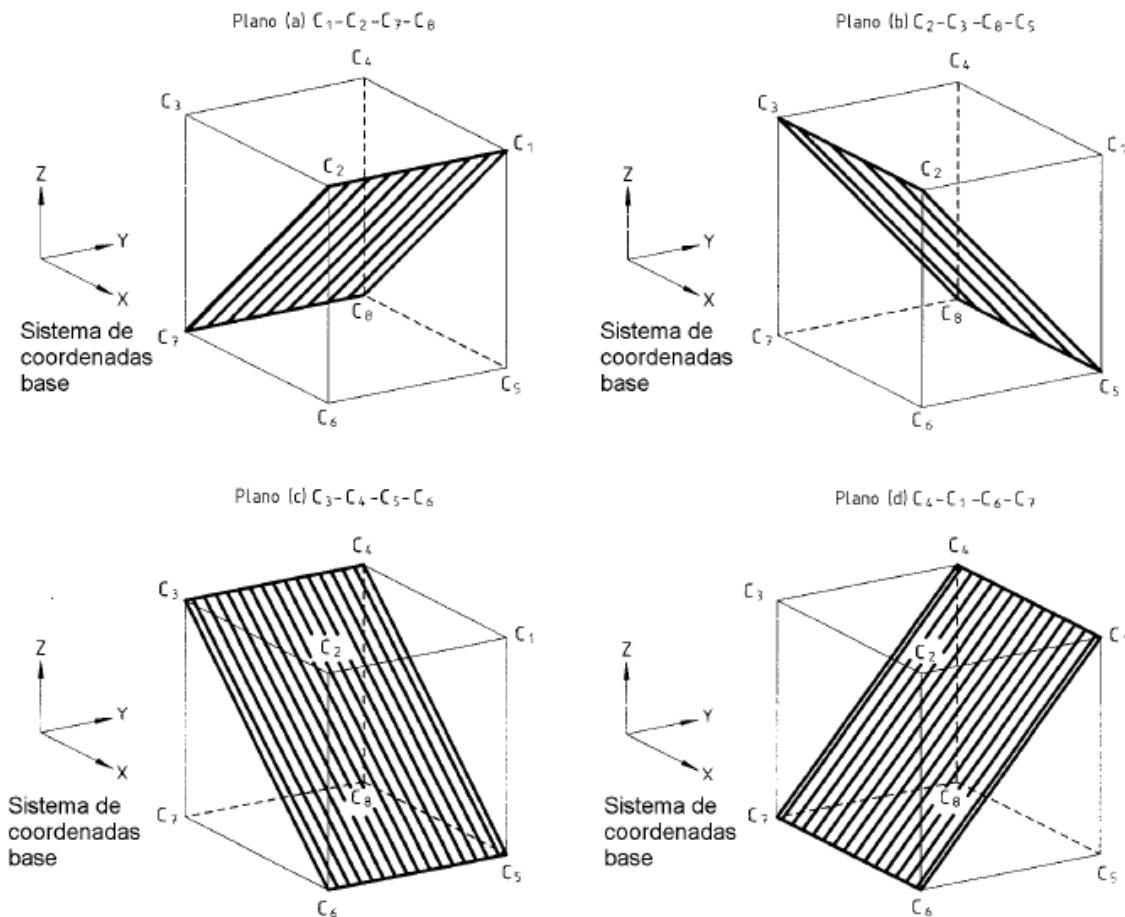


Fig. 3.2 - Cubo dentro del espacio de trabajo

3.8.3) Ubicación de los planos a utilizar dentro del cubo

Para los ensayos de posicionamiento se debe utilizar uno de los siguientes planos, para los cuales el fabricante ha declarado los valores válidos en la hoja de datos:

- a) $C_1 - C_2 - C_7 - C_8$
- b) $C_2 - C_3 - C_8 - C_5$
- c) $C_3 - C_4 - C_5 - C_6$
- d) $C_4 - C_1 - C_6 - C_7$

3.8.4) Posiciones a comprobar

Se ubican cinco puntos a medir en las diagonales del plano de medida que corresponden a los puntos P_1 a P_5 en el plano seleccionado transformados por el punto de offset axial (X_{MP}) y radial (Z_{MP}). Los puntos P_1 a P_5 son las posiciones para el punto de referencia de la muñeca del robot.

El plano de medida es paralelo al plano seleccionado (véase figura 3.3).

Los ensayos de posición deben especificarse en coordenadas de la base y/o coordenadas articulares.

P_1 es la intersección de las diagonales y es el centro del cubo. Los puntos P_2 a P_5 están ubicados a una distancia del extremo de las diagonales igual al $(10 \pm 2) \%$ de la longitud de la diagonal (véase figura 3.4). Si esto no es posible se debe informar del punto más cercano escogido sobre la diagonal.

Las posiciones utilizadas para las características de posicionamiento se dan en la siguiente tabla:

Características a ensayar	Posiciones				
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
Precisión de posición y repetibilidad de posición	X	X	X	X	X
Variación multidireccional de la precisión de posición	X	X	–	X	–
Precisión de distancia y repetibilidad de distancia	–	X	–	X	–
Tiempo de estabilización de posición	X	X	X	X	X
Rebose de posición	X	X	X	X	X
Deriva de las características de posición	X	–	–	–	–
Intercambiabilidad	X	X	X	X	X

Tabla 3.4 - Posiciones utilizadas para las características de posicionamiento

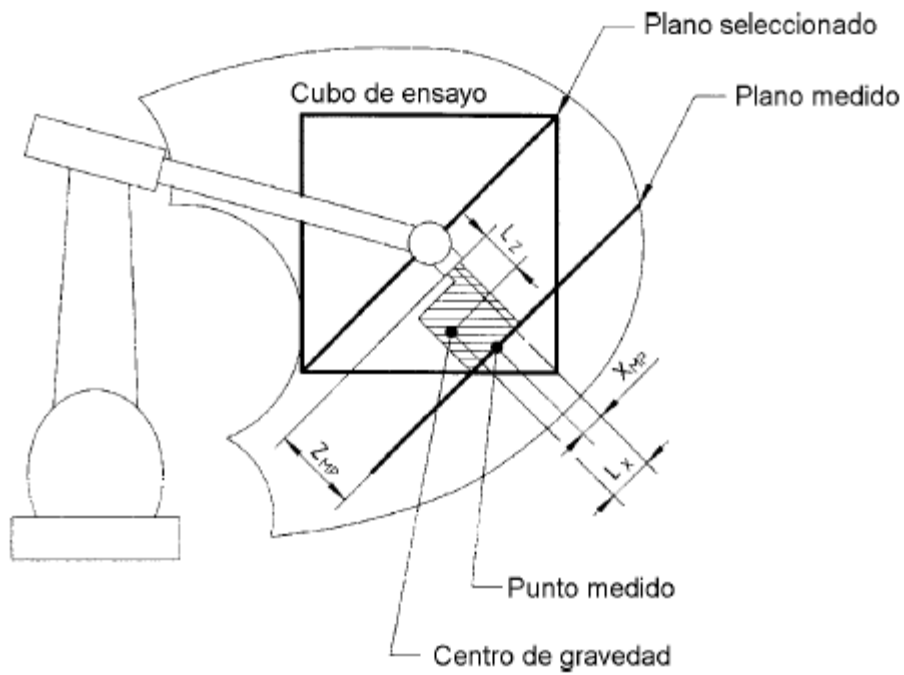


Fig. 3.3 - Plano seleccionado y plano de medida

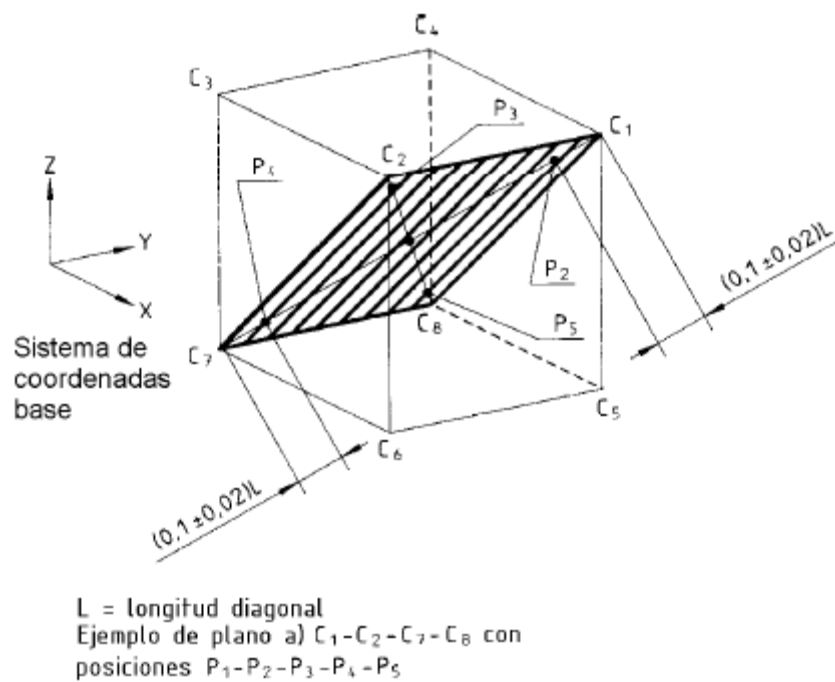


Fig. 3.4 - Posiciones a utilizarse

3.8.5) Requisitos de movimiento

Se deben mover todas las articulaciones del robot en la traslación entre cualquiera de dos posiciones.

Durante el ensayo se debería tener precaución en no sobrepasar las especificaciones de uso del fabricante.

3.8.6) Trayectorias a seguir

3.8.6.1) Ubicación de las trayectorias de ensayo: Se debe utilizar el cubo descrito en el apartado 3.8.2.

La trayectoria de ensayo se debe ubicar en uno de los cuatro planos mostrados en la figura 3.5. Para los robots de seis ejes, se debe utilizar el plano 1. Para los robots con menos de seis ejes se debe utilizar el plano especificado por el fabricante.

Durante la medición de las características de la trayectoria el centro del interfaz mecánico debería estar en el plano seleccionado (véase figura 3.3), y su orientación debería permanecer constante al mismo.

3.8.6.2) Formas y tamaños de las trayectorias de ensayo: La figura 3.6 proporciona un ejemplo de la posición de una trayectoria lineal, una trayectoria rectangular y dos trayectorias circulares en uno de los cuatro planos disponibles.

La forma de las trayectorias de ensayo debería ser lineal o circular excepto para la desviación de esquina. Si se definen trayectorias con otras formas éstas deben ser las especificadas por el fabricante y deben añadirse al informe del ensayo.

Para una trayectoria lineal en la diagonal del cubo, la longitud de la trayectoria debe ser del 80% de la distancia entre dos esquinas opuestas del plano seleccionado.

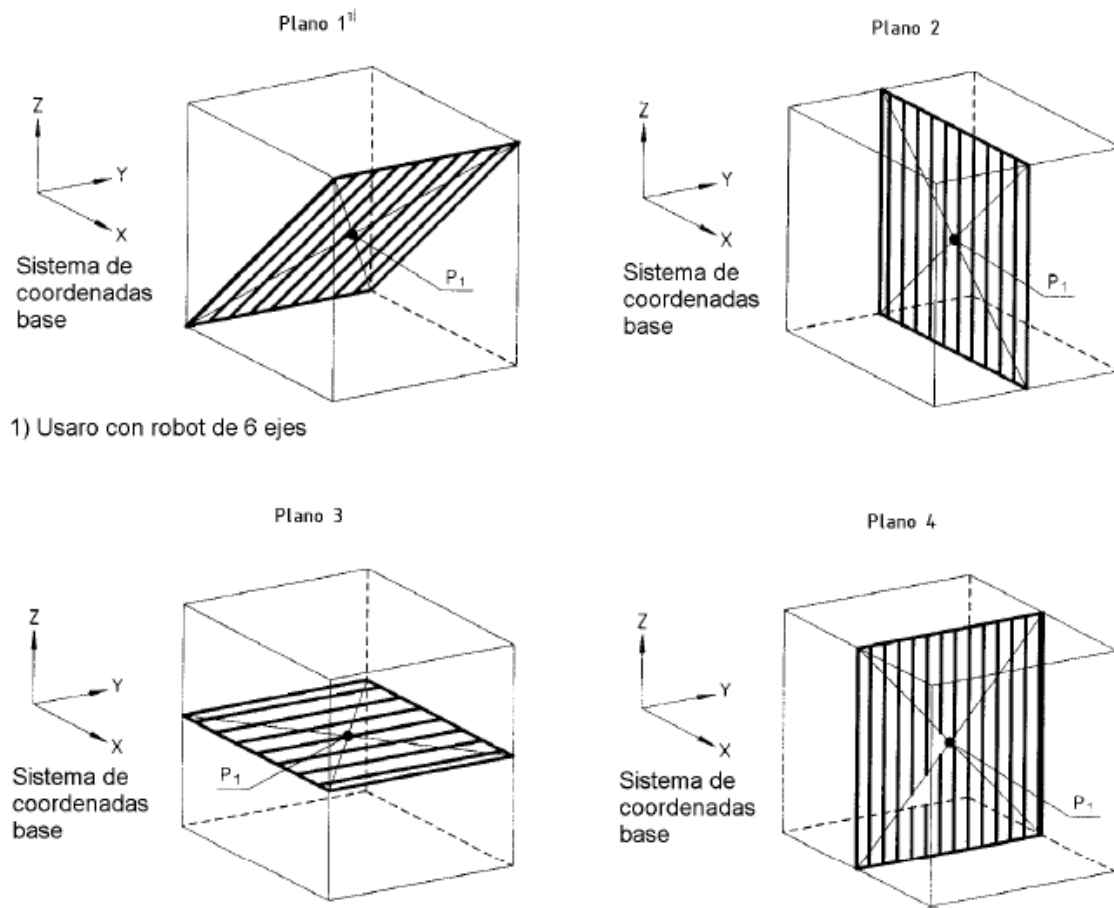
Para el ensayo de trayectoria circular, se debería ensayar dos círculos diferentes (véase figura 3.6).

El diámetro del círculo mayor debe ser el 80% de la longitud de un lado del cubo. El centro del círculo debe ser P_1 .

El círculo menor debería tener un diámetro del 10% del círculo mayor en el plano. El centro del círculo debe ser P_1 .

Se debe utilizar el mínimo de puntos programados posibles.

Para una trayectoria rectangular, las esquinas se denotan por E_1 , E_2 , E_3 y E_4 , cada una de las cuales se encuentra a una distancia de su respectiva esquina igual al $(10 \pm 2) \%$ de la diagonal del plano.



1) Usaro con robot de 6 ejes

Fig. 3.5 - Definiciones de los planos para la ubicación de las trayectorias de ensayo

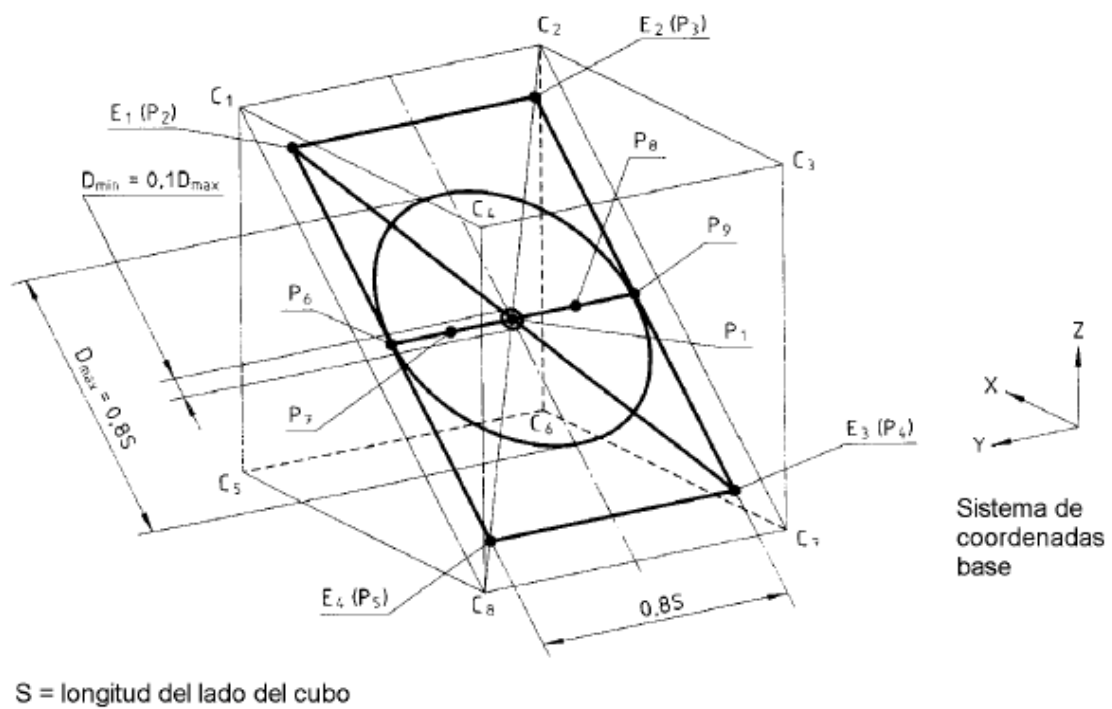


Fig. 3.6 - Ejemplos de trayectoria de ensayo

3.9) NÚMERO DE CICLOS

El número de ciclos a realizar al ensayar cada característica se define en la siguiente tabla:

Características a ser probadas	Número de círculos
Precisión de posición y repetibilidad de posición	30
Variación multidireccional de la precisión de posición	30
Precisión de distancia y repetibilidad de distancia	30
Tiempo de estabilización de posición	3
Rebose de posición	3
Deriva de las características de posición	Ciclos continuos durante 8 horas
Intercambiabilidad	30
Precisión y repetibilidad en la trayectoria	10
Precisión en reorientación durante la trayectoria	10
Desviación en esquina	3
Características de velocidad en la trayectoria	10
Tiempo mínimo de posicionamiento	3
Desviación de ondulación	3

Tabla 3.5 - Número de ciclos

3.10) PROCEDIMIENTO DE LOS ENSAYOS

La secuencia de los ensayos no tiene influencia en el resultado, pero se recomienda realizar el de tiempo de estabilización antes del de repetibilidad de posición, para la determinación del retardo de la medida. Los ensayos de rebose, precisión y repetibilidad de posición pueden realizarse de forma consecutiva. El ensayo de la deriva debe realizarse independientemente.

Las características de posición deben ensayarse bajo control punto a punto o con trayectoria continua. Las características de trayectoria deben realizarse bajo control de trayectoria.

La determinación de la precisión y repetibilidad en la trayectoria se puede realizar paralelamente a la velocidad.

Es recomendable que los ensayos de velocidad se realicen antes de medir la precisión de la trayectoria así como utilizar los mismos parámetros de la trayectoria. De esta manera se asegura el uso de los valores de referencia correctos durante la determinación de los criterios de la trayectoria.

Cuando se programe la velocidad constante de la trayectoria, se debería tener cuidado para asegurar que el control de la velocidad está fijado al 100% y que la velocidad no se reduce automáticamente como resultado de alguna limitación del robot a lo largo del camino que tiene que seguir.

Los ensayos que se pueden realizar simultáneamente pueden ser:

- Precisión / repetibilidad de la trayectoria y características de la velocidad
- Rebose y error al doblar la esquina

Excepto para la deriva de las características de posición, la captación de datos para una característica con un grupo de condiciones debe llevarse a cabo en el menor periodo de tiempo posible.

3.11) CARACTERÍSTICAS A ENSAYAR. APLICACIONES

Los ensayos descritos pueden ser aplicados total o parcialmente, dependiendo del tipo de robot y sus requerimientos.

4) TIPOS DE ENSAYOS

Tenemos cinco tipos de ensayo para realizar, estos son:

4.1 CARACTERÍSTICAS DE POSICIÓN

4.2 CARACTERÍSTICAS DE LA TRAYECTORIA

4.3 TIEMPO MÍNIMO DE POSICIONAMIENTO

4.4 COMPORTAMIENTO ESTÁTICO

4.5 CRITERIOS DE COMPORTAMIENTO EN APLICACIONES ESPECÍFICAS

Comenzamos describiendo el primer ensayo, con todos los diferentes tipos de ensayos que engloba.

4.1) CARACTERÍSTICAS DE POSICIÓN

4.1.1) Descripción general

Posiciones programadas (véase figura 4.1): Posiciones específicas a través de una programación por guiado, entrada numérica de datos a través de una maleta de programación o programación off-line.

Las posiciones programadas en el robot mediante programación por guiado tienen que definirse como el punto de medida en el robot (véase figura 4.1). Este punto se alcanza durante la programación moviendo el robot tan cerca como sea posible a los puntos definidos en el cubo (P_1, P_2, \dots). Las coordenadas registradas en el sistema de medida se utilizan entonces como “posiciones programadas” cuando se calcule la precisión basada en las posiciones consecutivas alcanzadas.

Posición alcanzada (véase figura 4.1): Posición lograda por el robot trabajando en modo automático en respuesta a una posición programada.

Las características de precisión y repetibilidad en la posición, cuantifican la diferencia que existe entre las posiciones programadas y las alcanzadas, y la fluctuación en las posiciones alcanzadas para una serie de visitas repetitivas a una posición programada.

Estos errores pueden ser causados por:

- Definiciones internas de control
- Errores en la transformación de coordenadas
- Diferencias entre las dimensiones de la estructura articulada y las utilizadas por el modelo del sistema de control del robot

- Fallos mecánicos como holguras, histéresis, fricciones e influencias externas como la temperatura

El método de la entrada de datos para los puntos programados depende de las características del controlador del robot y tiene una influencia significativa sobre las características de precisión. El método usado debe especificarse claramente en la hoja de datos o el informe de resultados.

Si la posición programada se especifica por entrada numérica de datos, la relación entre diferentes posiciones programadas se conoce (o puede ser determinada) y se requiere para la especificación y medición de las características de distancia.

Para la medición de la precisión de posición utilizando la entrada numérica de datos, se tiene que conocer la posición del sistema de coordenadas de la base del robot relativa a la posición del sistema de medida.

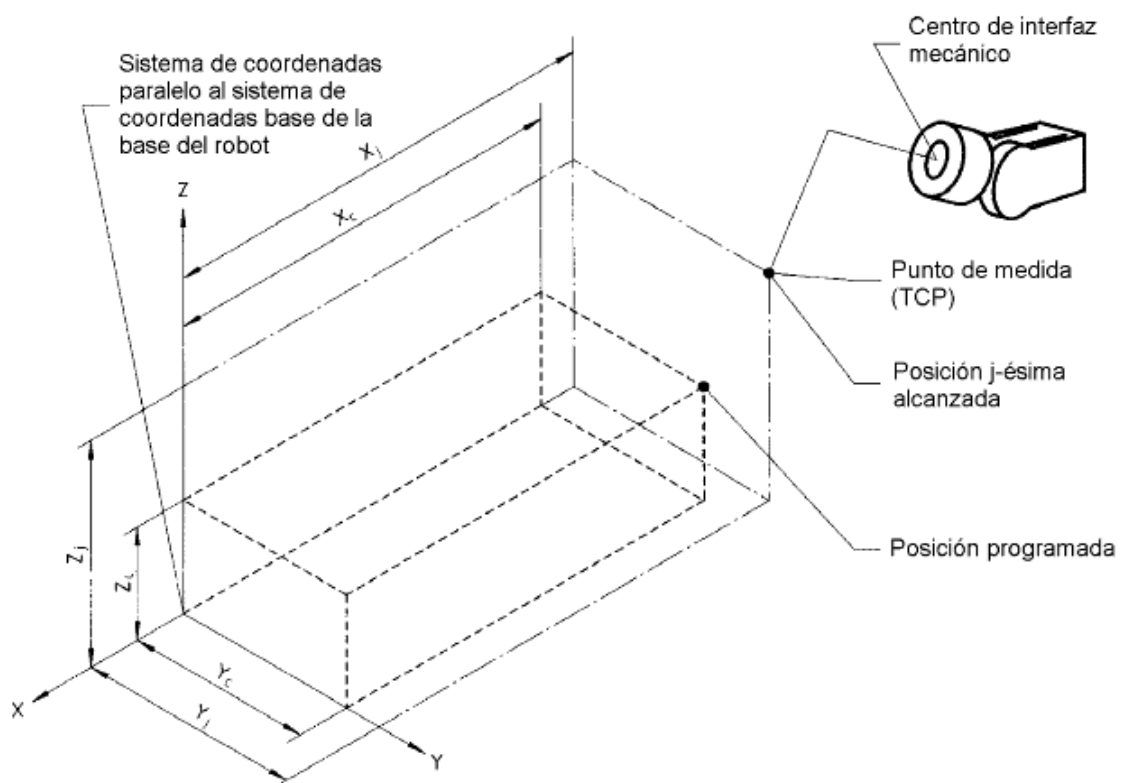


Fig. 4.1 - Relación entre la posición programada y la alcanzada

4.1.2) Precisión de posición y repetibilidad de posición

4.1.2.1) Precisión de posición (AP): Expresa la desviación entre las posiciones programadas y la media de las posiciones alcanzadas cuando el robot se aproxima, siempre en la misma dirección, al punto programado.

La precisión de posición se divide en:

- *Precisión de posicionamiento*: Es la diferencia entre la posición de un punto programado y el baricentro de las posiciones alcanzadas (véase figura 4.2). La precisión de posición se calcula como sigue:

$$AP_P = \sqrt{(\bar{x} - x_c)^2 + (\bar{y} - y_c)^2 + (\bar{z} - z_c)^2}$$

$$AP_x = (\bar{x} - x_c)$$

$$AP_y = (\bar{y} - y_c)$$

$$AP_z = (\bar{z} - z_c)$$

con

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j$$

$$\bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_j$$

\bar{x} , \bar{y} y \bar{z} son las coordenadas del baricentro de la nube de puntos obtenidos tras repetir la misma posición n veces.

x_c , y_c y z_c son las coordenadas de los puntos programados.

x_j , y_j y z_j son las coordenadas de la j -ésima posición alcanzada.

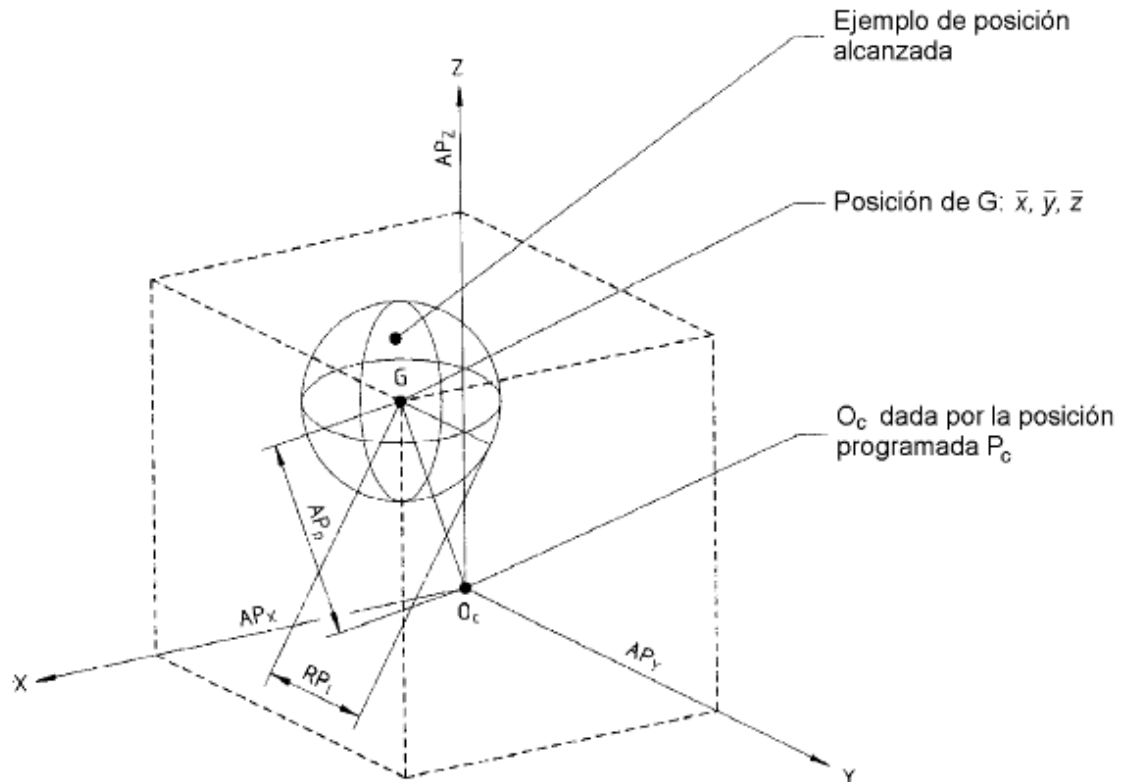


Fig. 4.2 - Precisión de posicionamiento y repetibilidad

- *Precisión de orientación:* Es la diferencia entre la orientación de un punto programado y el promedio de las orientaciones alcanzadas (véase figura 4.3). La precisión de orientación se calcula como sigue:

$$AP_a = (\bar{a} - a_c)$$

$$AP_b = (\bar{b} - b_c)$$

$$AP_c = (\bar{c} - c_c)$$

con

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_j$$

$$\bar{b} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n b_j$$

$$\bar{c} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n c_j$$

Estos valores son la media de los valores de los ángulos obtenidos en la misma posición repetida n veces.

a_c , b_c y c_c son los ángulos de las posiciones programadas.

a_j , b_j y c_j son los ángulos de la j -ésima posición alcanzada.

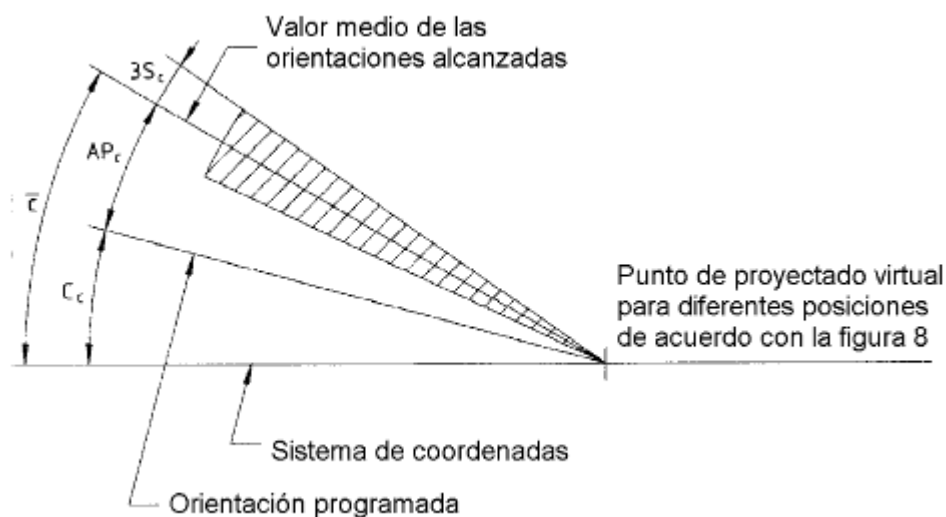


Fig. 4.3 - Precisión de orientación y repetibilidad

La siguiente tabla resume las condiciones del ensayo para la precisión de posición.

Carga	Velocidad	Posiciones	Número de ciclos
100% de la carga	100% de la velocidad 50% de la velocidad 10% de la velocidad	$P_1 - P_2 - P_3 - P_4 - P_5$	30
La masa de la carga reducida al 10% (opcional)	100% de la velocidad 50% de la velocidad 10% de la velocidad		

Tabla. 4.1 - Resumen de las condiciones de ensayo para la precisión de posición

- Empezando por P_1 , el robot mueve sucesivamente si interfaz mecánico a las posiciones P_5 , P_4 , P_3 , P_2 , P_1 . Cada una de estas posiciones debería visitarse usando una aproximación unidireccional como se muestra en cualquiera de los ciclos ilustrados en la figura 4.4. La dirección de las aproximaciones durante el ensayo debe ser similar a la usada durante la programación.

- Para cada posición, se debe calcular la precisión de posición (AP_p) y la precisión de orientación (AP_a , AP_b , AP_c).

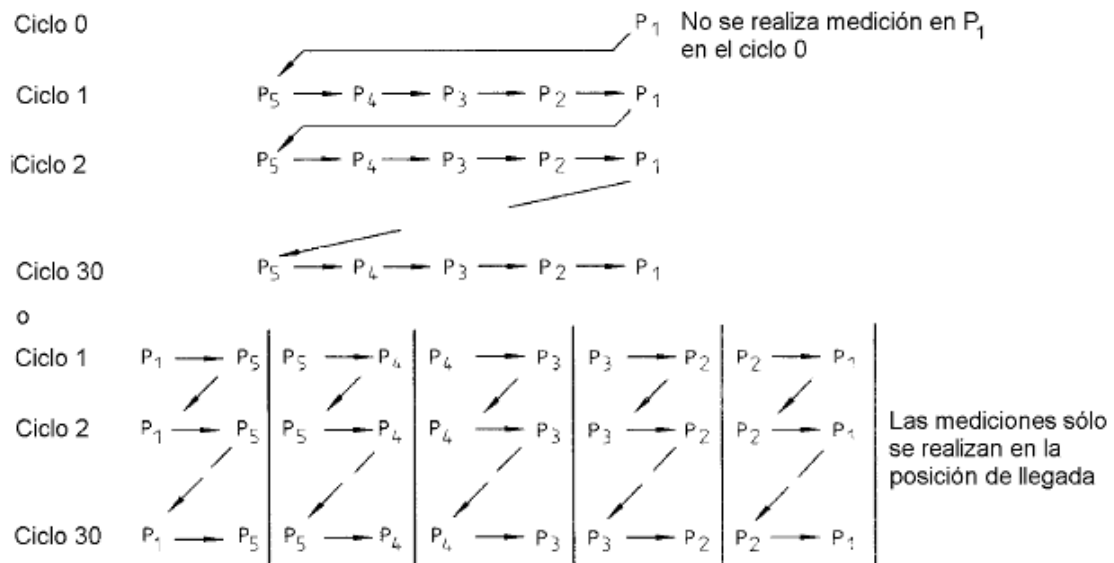


Fig. 4.4 - Ilustración de ciclos posibles

4.1.2.2) Repetibilidad de posición (RP): Expresa la dispersión de las posiciones alcanzadas tras n visitas repetidas en la misma dirección a una posición programada.

Para una posición dada, la repetibilidad se expresa por:

- El valor de RP_1 que es el radio de la esfera cuyo centro es el baricentro (véase figura 4.2).
- La dispersión de ángulos $\pm 3S_a, \pm 3S_b, \pm 3S_c$ respecto a la media de valores, \bar{a}, \bar{b} y \bar{c} donde S_a, S_b y S_c son las desviaciones estándar (véase figura 4.3).

La repetibilidad de posicionamiento se calcula:

$$RP_1 = \bar{l} + 3S_l$$

con

$$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_j$$

$$l_j = \sqrt{(x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2 + (z_j - \bar{z})^2}$$

$\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ y x_j, y_j y z_j definidos en el apartado 4.1.2.1.

$$S_l = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_j - \bar{l})^2}{n-1}}$$

La repetibilidad de orientación se calcula como sigue:

$$RP_a = \pm 3S_a = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (a_j - \bar{a})^2}{n-1}}$$

$$RP_b = \pm 3S_b = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (b_j - \bar{b})^2}{n-1}}$$

$$RP_c = \pm 3S_c = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (c_j - \bar{c})^2}{n-1}}$$

La siguiente tabla resume las condiciones de ensayo de la repetibilidad de posición.

Carga	Velocidad	Posiciones	Número de ciclos
100% de la carga	100% de la velocidad 50% de la velocidad 10% de la velocidad	P ₁ - P ₂ - P ₃ - P ₄ - P ₅	30
La masa de la carga reducida al 10% (opcional)	100% de la velocidad 50% de la velocidad 10% de la velocidad		

Tabla. 4.2 - Resumen de las condiciones de ensayo para la repetibilidad de posición

- Para cada posición, se calculan las desviaciones RP y angular RP_a , RP_b y RP_c . Para aplicaciones especiales RP puede también expresarse mediante sus componentes RP_x , RP_y y RP_z .

4.1.2.3) Variación multidireccional de la precisión de posición (vAP):

Expresa la dispersión de la media de las posiciones alcanzadas cuando se visita n veces la misma posición programada desde tres direcciones ortogonales diferentes (véase figura 4.5).

- vAP_p es la distancia máxima entre los baricentros de la nube de puntos alcanzados al final de cada trayectoria diferente.

- vAP_a , vAP_b , vAP_c , es la desviación máxima entre el valor medio de los ángulos alcanzados al final de diferentes trayectorias.

La variación multidireccional de la precisión de posición se calcula como sigue:

$$vAP_p = \max. \sqrt{(\bar{x}_h - \bar{x}_k)^2 + (\bar{y}_h - \bar{y}_k)^2 + (\bar{z}_h - \bar{z}_k)^2} \quad h, k = 1, 2, 3$$

Las trayectorias de aproximación son tres:

$$vAP_a = \max. \left| \bar{a}_h - \bar{a}_k \right| \quad h, k = 1, 2, 3$$

$$vAP_b = \max. \left| \bar{b}_h - \bar{b}_k \right| \quad h, k = 1, 2, 3$$

$$vAP_c = \max. \left| \bar{c}_h - \bar{c}_k \right| \quad h, k = 1, 2, 3$$

La siguiente tabla resume las condiciones del ensayo para la variación multidireccional de la precisión de posición.

Carga	Velocidad	Posiciones	Número de ciclos
100% de la carga	100% de la velocidad 50% de la velocidad 10% de la velocidad	P ₁ - P ₂ - P ₃ - P ₄ - P ₅	30
La masa de la carga reducida al 10% (opcional)	100% de la velocidad 50% de la velocidad 10% de la velocidad		

Tabla. 4.3 - Resumen de las condiciones del ensayo para la variación multidireccional de la precisión de posición

- El robot se programa para mover su interfaz mecánico a las posiciones de acuerdo con tres trayectorias de aproximación paralelas a los ejes del sistema de coordenadas de la base del robot. Para P₁ en la dirección negativa y para P₂ y P₄ la aproximación desde la parte interior del cuerpo del cubo (véanse figuras 4.5 y 4.6). Si esto no es posible, las direcciones de aproximación utilizadas deben especificarse por el fabricante y deben comunicarse.

- Para cada posición se calcula: vAP_p , vAP_a , vAP_b , vAP_c .

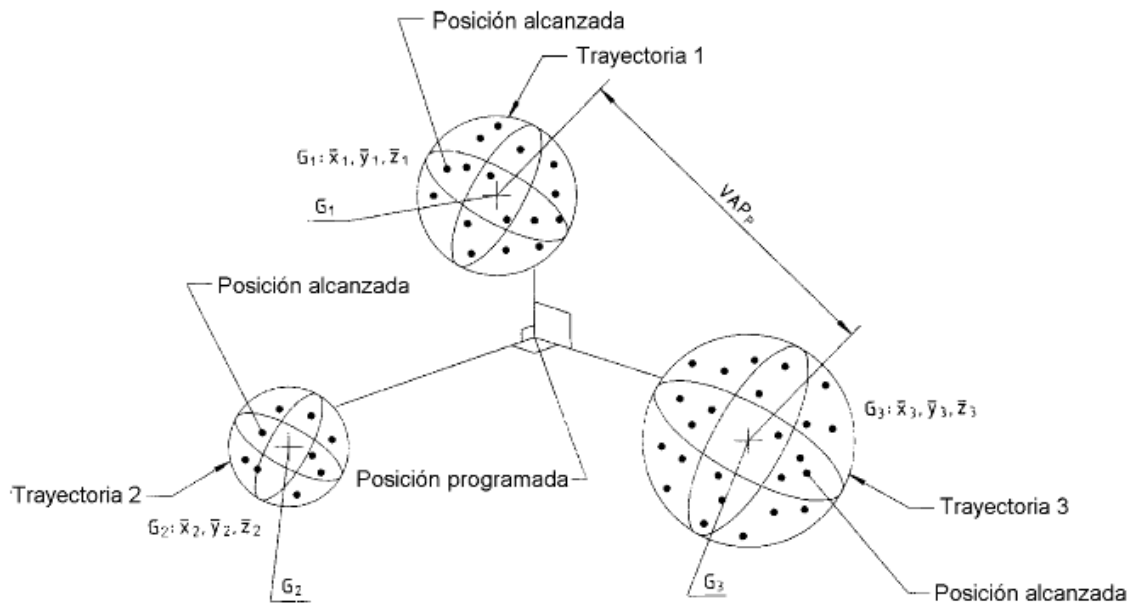


Fig. 4.5 - Variación multidireccional de la precisión de posición

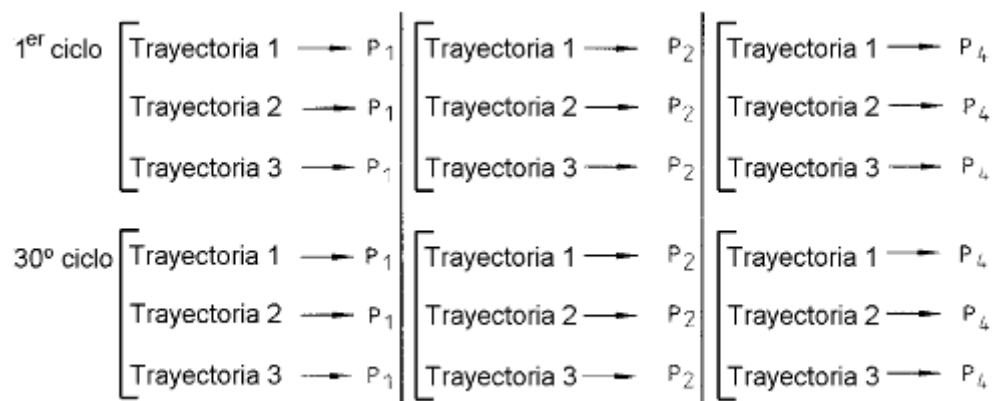


Fig. 4.6 - Ilustración de un ciclo

4.1.3) Precisión de distancia y repetibilidad de distancia

Estas características sólo son aplicables a los robots con la capacidad de programación off-line o introducción manual de datos

4.1.3.1) Generalidades: Las características de precisión y repetibilidad en la distancia cuantifican las desviaciones que ocurren en el cálculo de distancias entre dos posiciones programadas y dos grupos de posiciones medias alcanzadas, así como las fluctuaciones en las distancias para una serie de movimientos repetitivos entre dos posiciones.

La precisión y repetibilidad en la distancia pueden medirse programando una serie de posiciones de dos formas diferentes:

- Ordenando al robot moverse a ambas posiciones mediante programación off-line.
- Ordenando al robot moverse a una posición por programación guiada y programar una distancia mediante la introducción manual.

4.1.3.2) Precisión en la distancia (AD): Expresa la desviación en el posicionamiento y orientación entre la distancia programada y la media de las distancias alcanzadas.

Dadas las posiciones programadas P_{c1} y P_{c2} y las posiciones alcanzadas P_{1j} , P_{2j} , la precisión en la distancia de posicionamiento es la diferencia de distancias entre P_{c1} , P_{c2} y P_{1j} , P_{2j} (véase figura 4.7) y la distancia repetida n veces.

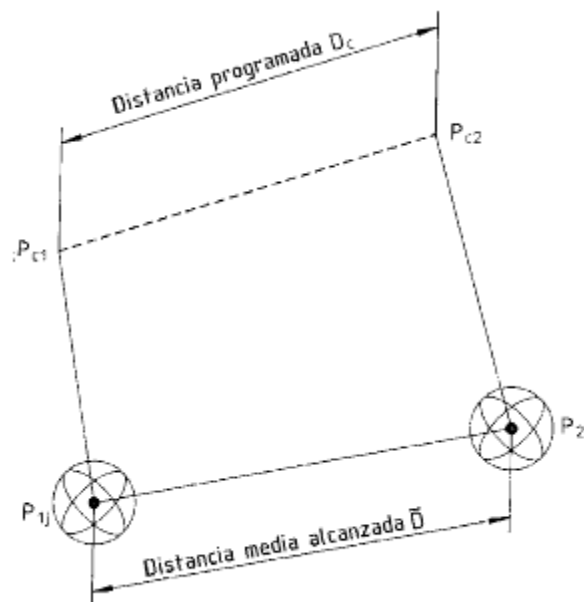


Fig. 4.7 - Precisión en la distancia

La precisión en la distancia se determina mediante los dos factores; precisión en la distancia de posicionamiento y precisión en la distancia de orientación.

- *Precisión de la distancia de posicionamiento AD_p :*

$$AD_p = \bar{D} - D_c$$

donde

$$\bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_j$$

$$D_j = |P_{1j} - P_{2j}| = \sqrt{(x_{1j} - x_{2j})^2 + (y_{1j} - y_{2j})^2 + (z_{1j} - z_{2j})^2}$$

$$D_c = |P_{c1} - P_{c2}| = \sqrt{(x_{c1} - x_{c2})^2 + (y_{c1} - y_{c2})^2 + (z_{c1} - z_{c2})^2}$$

con

x_{c1}, y_{c1}, z_{c1} como las coordenadas de P_{c1} disponibles en el controlador del robot

x_{c2}, y_{c2}, z_{c2} como las coordenadas de P_{c2} disponibles en el controlador del robot

x_{1j}, y_{1j}, z_{1j} como las coordenadas de P_{1j}

x_{2j}, y_{2j}, z_{2j} como las coordenadas de P_{2j}

n como el número de repeticiones

La precisión en la distancia de posicionamiento se puede expresar para cada eje del sistema de coordenadas de la base. Los cálculos son como sigue:

$$AD_x = \bar{D}_x - D_{cx}$$

$$AD_y = \bar{D}_y - D_{cy}$$

$$AD_z = \bar{D}_z - D_{cz}$$

donde

$$\bar{D}_x = \frac{l}{n} \sum_{j=1}^n D_{xj} = \frac{l}{n} \sum_{j=1}^n |x_{1j} - x_{2j}|$$

$$\bar{D}_y = \frac{l}{n} \sum_{j=1}^n D_{yj} = \frac{l}{n} \sum_{j=1}^n |y_{1j} - y_{2j}|$$

$$\bar{D}_z = \frac{l}{n} \sum_{j=1}^n D_{zj} = \frac{l}{n} \sum_{j=1}^n |z_{1j} - z_{2j}|$$

$$D_{cx} = |x_{c1} - x_{c2}|$$

$$D_{cy} = |y_{c1} - y_{c2}|$$

$$D_{cz} = |z_{c1} - z_{c2}|$$

- *Precisión en la distancia de orientación:*

$$AD_a = \bar{D}_a - D_{ca}$$

$$AD_b = \bar{D}_b - D_{cb}$$

$$AD_c = \bar{D}_c - D_{cc}$$

donde

$$\bar{D}_a = \frac{l}{n} \sum_{j=1}^n D_{aj} = \frac{l}{n} \sum_{j=1}^n |a_{1j} - a_{2j}|$$

$$\bar{D}_b = \frac{l}{n} \sum_{j=1}^n D_{bj} = \frac{l}{n} \sum_{j=1}^n |b_{1j} - b_{2j}|$$

$$\bar{D}_c = \frac{l}{n} \sum_{j=1}^n D_{cj} = \frac{l}{n} \sum_{j=1}^n |c_{1j} - c_{2j}|$$

$$D_{ca} = |a_{c1} - a_{c2}|$$

$$D_{cb} = |b_{c1} - b_{c2}|$$

$$D_{cc} = |c_{c1} - c_{c2}|$$

con

a_{c1} , b_{c1} y c_{c1} como las orientaciones de P_{c1} disponibles en el controlador del robot

a_{c2} , b_{c2} y c_{c2} como las orientaciones de P_{c2} disponibles en el controlador del robot

a_{1j} , b_{1j} y c_{1j} como las orientaciones de P_{1j}

a_{2j} , b_{2j} y c_{2j} como las orientaciones de P_{2j}

n como el número de repeticiones

La siguiente tabla resume las condiciones del ensayo para la precisión en la distancia.

Carga	Velocidad	Posiciones	Número de ciclos
100% de la carga	100% de la velocidad 50% de la velocidad 10% de la velocidad	P ₂ – P ₄	30

Tabla. 4.4 - Resumen de las condiciones para la precisión en la distancia

- El robot se programa para mover su interfaz mecánico sucesivamente entre las posiciones P₂ y P₄ empezando por la P₄. Se toman las mediciones unidireccionalmente (véase figura 4.8).

- Como mínimo se debe comunicar el valor AD_p.

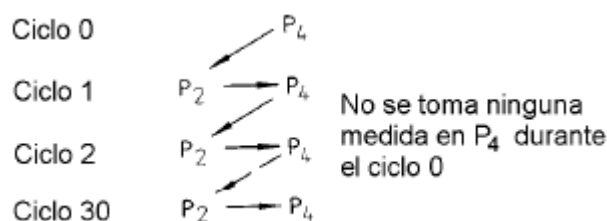


Fig. 4.8 - Ilustración de un ciclo

4.1.3.3) Repetibilidad en la distancia (RD): Es la proximidad entre varias distancias alcanzadas para la misma distancia programada, repetida n veces en la misma dirección.

La repetibilidad en la distancia incluye la repetibilidad de posicionamiento y orientación.

- *Repetibilidad en la distancia para una distancia programada:*

$$RD = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_j - \bar{D})^2}{n-1}}$$

$$RD_x = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_{xj} - \bar{D}_x)^2}{n-1}}$$

$$RD_y = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_{yj} - \bar{D}_y)^2}{n-1}}$$

$$RD_z = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_{zj} - \bar{D}_z)^2}{n-1}}$$

- Repetibilidad en la distancia para la orientación:

$$RD_a = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_{aj} - \bar{D}_a)^2}{n-1}}$$

$$RD_b = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_{bj} - \bar{D}_b)^2}{n-1}}$$

$$RD_c = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_{cj} - \bar{D}_c)^2}{n-1}}$$

Con las diferentes variables definidas en el apartado 4.1.3.2.

La siguiente tabla resume las condiciones de ensayo de la repetibilidad en la distancia.

Carga	Velocidad	Posiciones	Número de ciclos
100% de la carga	100% de la velocidad 50% de la velocidad 10% de la velocidad	P ₂ - P ₄	30

Tabla. 4.5 - Resumen de las condiciones del ensayo de la repetibilidad en la distancia

- Se debe comunicar el valor RD .

4.1.4) Tiempo de estabilización de posición

El tiempo de estabilización de posición es una característica del robot que cuantifica con qué rapidez un robot puede pararse en una posición alcanzada. La figura 4.9 ilustra en tres dimensiones un ejemplo de aproximación a una posición alcanzada. Debe hacerse notar que el tiempo de estabilización de posición esta también relacionado con el rebose y otros parámetros del robot.

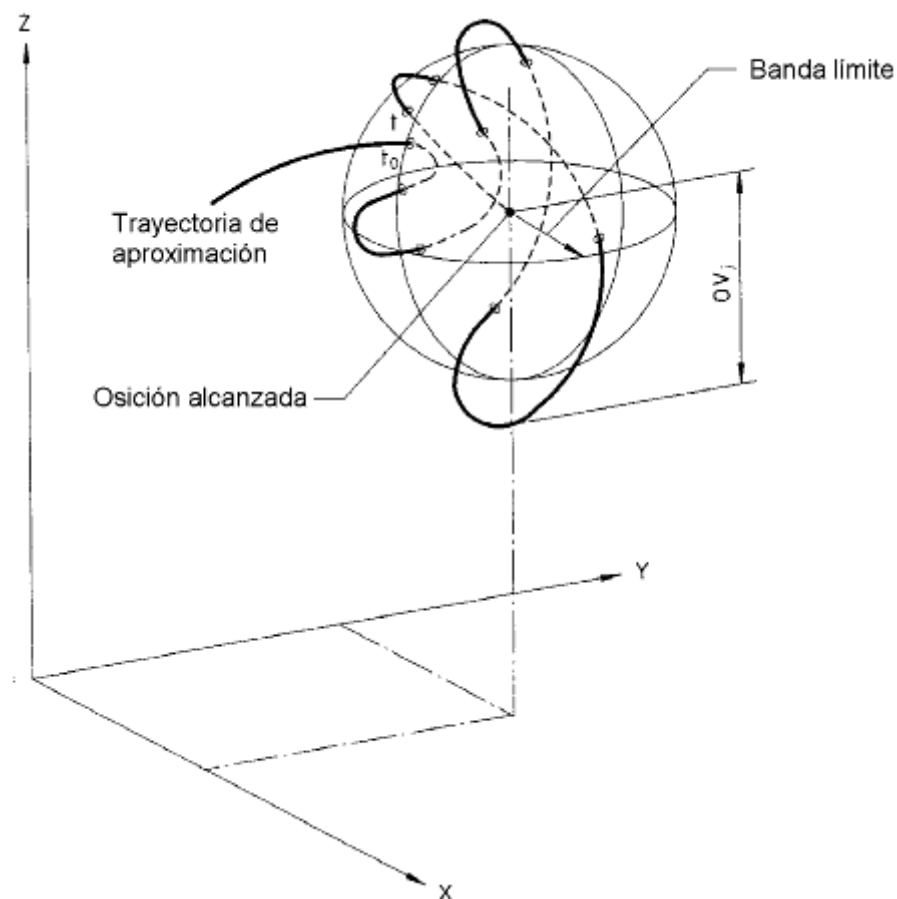


Fig. 4.9 - Tiempo de estabilización y rebose de posición, en una presentación tridimensional

El tiempo de estabilización de la posición debe medirse de la misma manera que el rebose en el apartado 4.1.5. El robot ejecuta el mismo ciclo que en el apartado 4.1.2.1 con la carga de ensayo y las velocidades del ensayo. Tras la aproximación a la posición programada P_n , la posición del punto de medida debe medirse continuamente hasta que la estabilización se haya conseguido.

El tiempo de estabilización de posición se mide como el tiempo transcurrido desde el momento en que se cruza la banda límite hasta que el robot se mantenga siempre dentro de la banda límite. La banda límite es la repetibilidad tal como se define en el apartado 4.1.2.2 o el valor especificado por el fabricante.

Este procedimiento debe repetirse tres veces. Para cada posición se calcula el valor medio t de los tres ciclos (véase figura 4.10).

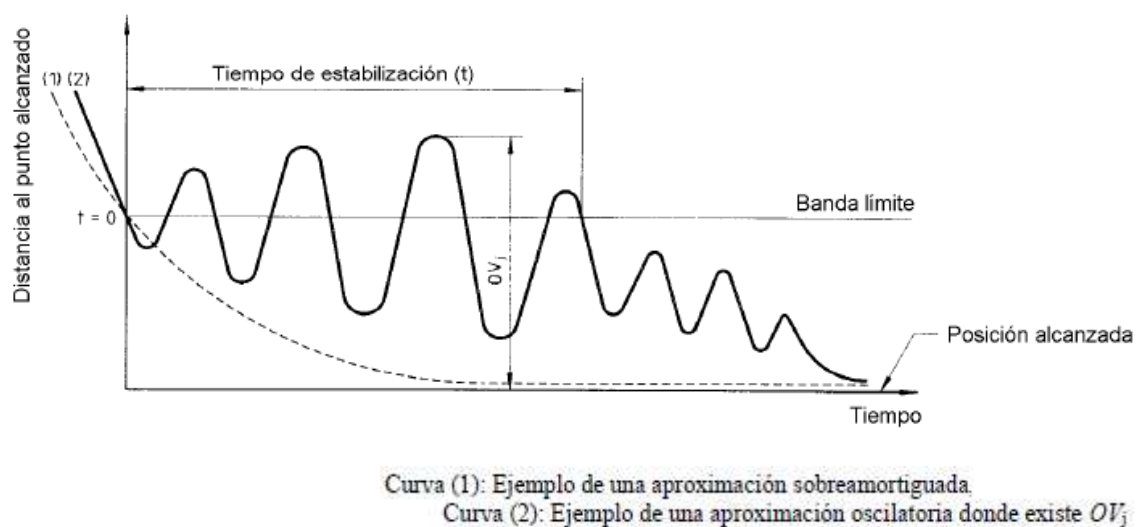


Fig. 4.10 - Tiempo de estabilización y rebose de posición

La siguiente tabla resume las condiciones del ensayo para el tiempo de estabilización de posición.

Carga	Velocidad	Posiciones	Número de ciclos
100% de la carga	100% de la velocidad 50% de la velocidad 10% de la velocidad	P ₁	3
La masa de la carga reducida al 10% (opcional)	100% de la velocidad 50% de la velocidad 10% de la velocidad		

Tabla. 4.6 - Resumen de las condiciones del ensayo para el tiempo de estabilización de posición

4.1.5) Rebose de posición

El propósito de medir el rebose de posición es cuantificar la capacidad del robot para realizar paradas suaves y precisas en una posición alcanzada. Debe hacerse notar que el rebose de posición esta también relacionado con el tiempo de estabilización de posición.

El rebose se mide como la distancia máxima a partir de la posición alcanzada tras el momento en que el robot cruza por primera vez la banda límite y cuando sale de la banda límite otra vez.

Para medir el rebose de posición, el robot ejecuta el mismo ciclo que en el apartado 4.1.2.1 con la carga de ensayo y las velocidades del ensayo. El rebose de posición es igual a la distancia al punto máximo alcanzado tras haber sobrepasado el punto de

medida P_1 . El rebose debe medirse tres veces y se debe calcular el valor máximo de los tres ciclos (véase figura 4.10).

El rebose de posición se calcula:

$$OV = \text{máx. } OV_j$$

$$OV_j = \text{máx. } D_{ij} \text{ si } \text{máx. } D_{ij} > \text{banda límite}$$

$$= 0 \quad \text{si } \text{máx. } D_{ij} \leq \text{banda límite}$$

$$\text{máx. } D_{ij} = \text{máx. } \sqrt{(x_{ij} - x_j)^2 + (y_{ij} - y_j)^2 + (z_{ij} - z_j)^2} \quad i = 1, 2, \dots, m$$

donde i representa el número de muestras medidas después de que el robot haya alcanzado la banda límite.

Para aplicaciones especiales OV también puede expresarse por sus componentes OV_x , OV_y , OV_z .

La siguiente tabla resume las condiciones del ensayo para el rebose de posición.

Carga	Velocidad	Posiciones	Número de ciclos
100% de la carga	100% de la velocidad 50% de la velocidad 10% de la velocidad	P_1	3
La masa de la carga reducida al 10% (opcional)	100% de la velocidad 50% de la velocidad 10% de la velocidad		

Tabla. 4.7 - Resumen de las condiciones del ensayo para el rebose de la posición

4.1.6) Deriva de las características de posición

- *Deriva de la precisión de posición (dAP)*: Es la variación de la precisión en la posición durante un tiempo (T) especificado. Esta deriva se puede calcular como sigue:

$$dAP_p = |AP_{t=1} - AP_{t=T}|$$

$$dAP_a = |AP_{at=1} - AP_{at=T}|$$

$$dAP_b = |AP_{bt=1} - AP_{bt=T}|$$

$$dAP_c = |AP_{ct=1} - AP_{ct=T}|$$

Donde AP está definida en el apartado 4.1.2.1 en relación con la posición programada cuando está en frío.

Se debería anotar el valor máximo.

- *Deriva en la repetibilidad de posición (dRP)*: Es la variación de la repetibilidad de posición durante un tiempo (T) especificado. Se puede calcular como sigue:

$$dRP_p = |RP_{t=1} - RP_{t=T}|$$

$$dRP_a = |RP_{at=1} - RP_{at=T}|$$

$$dRP_b = |RP_{bt=1} - RP_{bt=T}|$$

$$dRP_c = |RP_{ct=1} - RP_{ct=T}|$$

Donde RP se define en el apartado 4.1.2.2.

Se debería comunicar el valor máximo.

La siguiente tabla resume las condiciones del ensayo para las características de la deriva de posición.

Carga	Velocidad	Posiciones	Número de ciclos
100 % de la carga	100% de la velocidad 50% de la velocidad 10% de la velocidad	P ₁	Ciclos continuos durante 8 horas.

Tabla. 4.8 - Resumen de las condiciones del ensayo para la deriva de las características de posición

- Las mediciones de la deriva deberían empezar en frío y continuar durante varias horas mientras se va calentando. Se debería seguir la siguiente secuencia:

- 1.- Se programa el ciclo del ensayo con todos los sistemas activos.
- 2.- Se apaga el robot durante 8 horas.
- 3.- Se reinicia el robot e iniciar el ciclo automático programado.

- Ciclo de medida: El robot se programa para mover su interfaz mecánico a P₁ empezando en P₂. Todas las articulaciones tienen que moverse cuando vuelve de P₁ a P₂ (10 veces).

- Ciclo de calentamiento: Todas las articulaciones tiene que moverse un 70% de su alcance máximo con la velocidad máxima posible (véase tabla 4.8) cuando vuelva de P_1 a P_2 (10 veces). Véase también el diagrama en la figura 4.11. Se pueden elegir valores diferentes para aplicaciones especiales.

- Las mediciones pueden pararse antes de las ocho horas si el ritmo de cambio de la deriva (dAP) para cinco grupos seguidos es menor que el 10% del ritmo de cambio más grande durante la primera hora. Las medidas se utilizan para calcular la precisión y repetibilidad de posición. Los resultados se muestran en función del tiempo. El tiempo entre ciclos de medida debe ser 10 minutos (programa de calentamiento, véanse figuras 4.11 y 4.12).

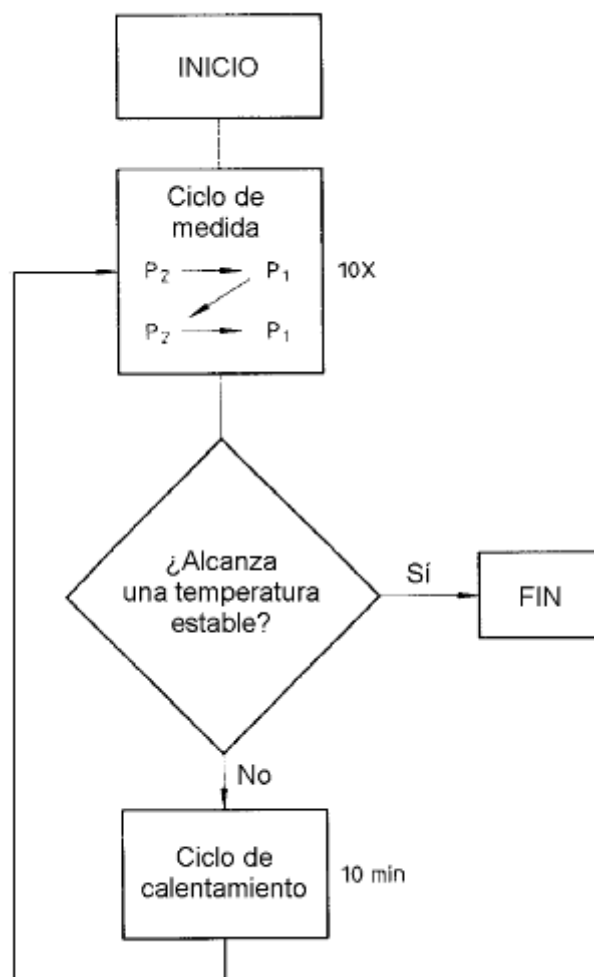


Fig. 4.11 - Ilustración de la medición de la deriva

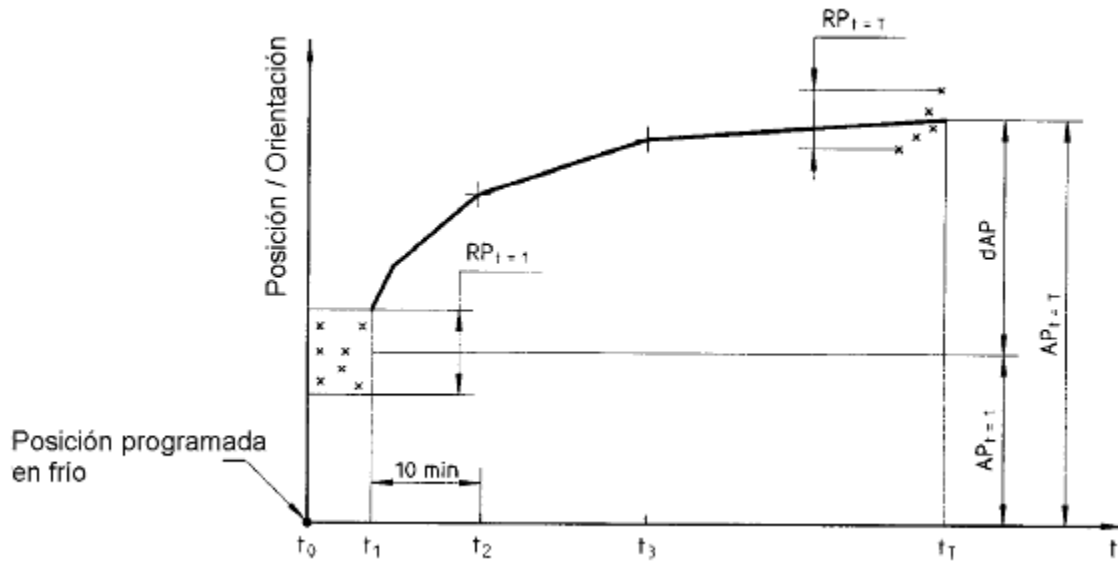


Fig. 4.12 - Características de la deriva de posición

4.1.7) Intercambiabilidad (E)

La intercambiabilidad expresa la desviación de los baricentros cuando diferentes robots del mismo tipo se intercambian bajo las mismas condiciones ambientales, el mismo montaje mecánico y utilizan el mismo programa de tareas.

El valor de E es la distancia entre los baricentros de los dos robots que en los ensayos tienen la desviación máxima (véase figura 4.13).

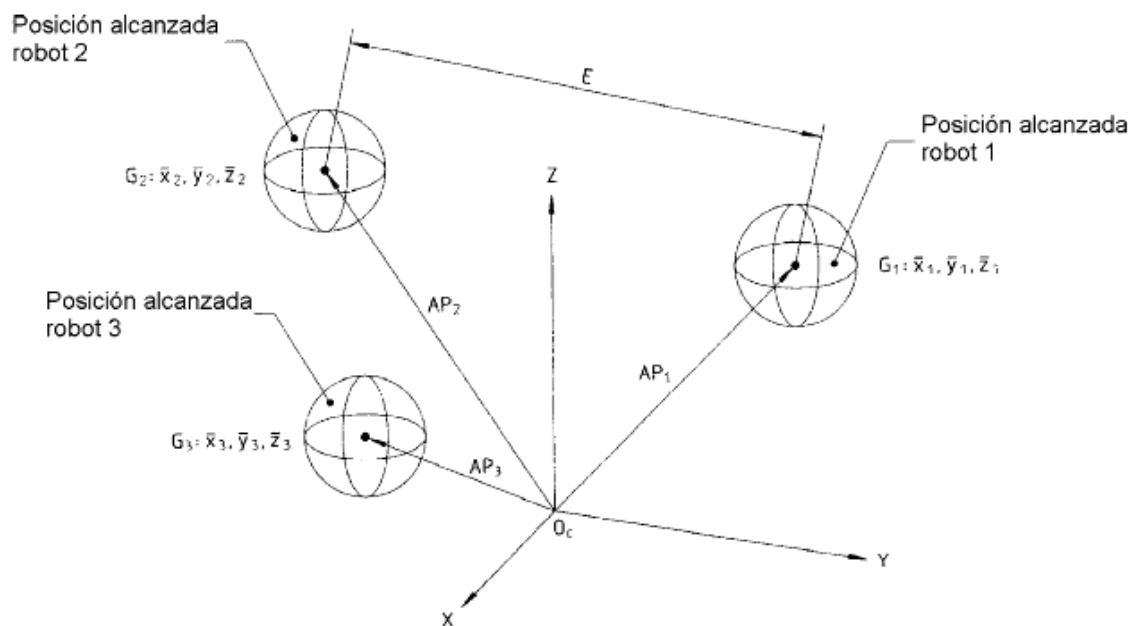


Fig. 4.13 - Intercambiabilidad

La característica de intercambiabilidad es debida a tolerancias mecánicas, errores en la calibración de los ejes y errores de montaje.

Las posiciones para el ensayo de intercambio deben ser P_1 , P_2 , P_3 , P_4 y P_5 y deben ser las mismas para todos los robots.

Las posiciones para los cinco puntos deben programarse sobre el primer robot y deben permanecer iguales para los demás robots durante el ensayo.

El ensayo debe ejecutarse con un 100% de carga y 100% de velocidad y debe realizarse con cinco robots del mismo tipo.

La siguiente tabla resume las condiciones del ensayo para la intercambiabilidad.

Carga	Velocidad	Posiciones	Número de ciclos en cada robot	Número de robots
100% de la carga	100% de la velocidad	$P_1 - P_2 - P_3 - P_4 - P_5$	30	5

Tabla. 4.9 - Resumen de las condiciones del ensayo para la intercambiabilidad

El primer robot debe instalarse en su lugar de anclaje como especifica el fabricante. Para cada punto P_1 , P_2 , P_3 , P_4 y P_5 se deben calcular los baricentros en el mismo sistema de coordenadas de referencia.

La precisión de posición (AP_{pj}) para cada uno de los otros robots se debe calcular utilizando la misma base de montaje de referencia mientras se mantiene fijo el sistema de medida y se utiliza el mismo programa.

La intercambiabilidad se calcula como sigue:

$$E = \text{máx.} \sqrt{(x_h - x_k)^2 + (y_h - y_k)^2 + (z_h - z_k)^2} \quad h, k = 1, 2, \dots, 5$$

4.2) CARACTERÍSTICAS DE LA TRAYECTORIA

4.2.1) Generalidades

La precisión de la trayectoria y las definiciones de repetibilidad son independientes de la forma de la trayectoria programada. La figura 4.14 muestra una ilustración general de la precisión de la trayectoria y la repetibilidad de la trayectoria.

Las características de la trayectoria descritas en los apartados siguientes son válidas en general para todos los métodos de programación.

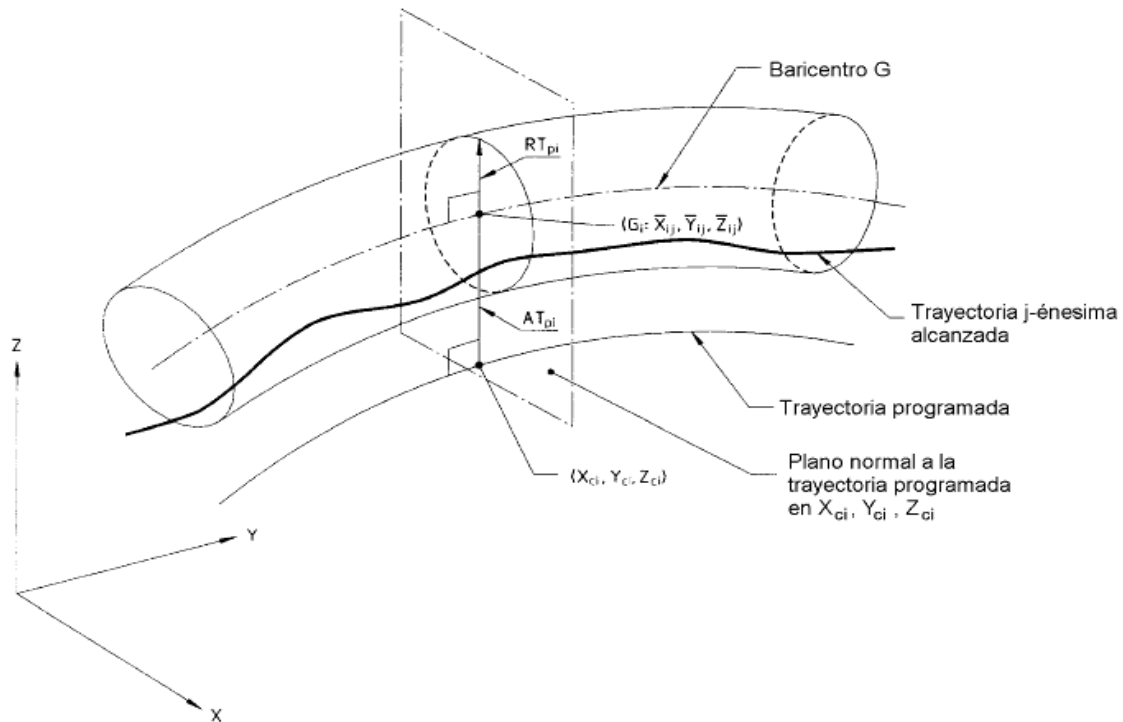


Fig. 4.14 - Precisión de la trayectoria y repetibilidad de la trayectoria para una trayectoria programada

4.2.2) Precisión de la trayectoria (AT)

Caracteriza la habilidad de un robot para mover su interfaz mecánico a lo largo de una trayectoria programada en la misma dirección n veces.

La precisión de trayectoria es la desviación máxima de la trayectoria a lo largo de una trayectoria obtenida en posicionamiento y orientación.

La precisión del posicionamiento en la trayectoria, AT_p se define como la distancia máxima entre la posición de la trayectoria programada y los baricentros G_i , de los n ciclos medidos, para cada número de puntos calculados (m) a lo largo de la trayectoria.

La precisión de trayectoria se determina por dos factores:

- *Precisión del posicionamiento en la trayectoria (AT_p):* Es la diferencia entre la posición de la trayectoria programada y la línea baricentro de la nube de posiciones de las trayectorias alcanzadas.

La precisión del posicionamiento en la trayectoria se calcula como sigue:

$$AT_p = \max. \sqrt{(\bar{x}_i - x_{ci})^2 + (\bar{y}_i - y_{ci})^2 + (\bar{z}_i - z_{ci})^2} \quad i = 1 \dots m$$

donde

$$\bar{x}_i = \frac{l}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij}$$

$$\bar{y}_i = \frac{l}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij}$$

$$\bar{z}_i = \frac{l}{n} \sum_{j=1}^n z_{ij}$$

Cuando se calcula AT_p se debería tener en cuenta lo siguiente:

- Dependiendo de la forma de la trayectoria programada y la velocidad del ensayo, se selecciona el número de puntos a lo largo de la trayectoria programada y sus planos normales correspondientes. El número de planos normales escogidos debe mencionarse en el informe del ensayo.

- x_{ci} , y_{ci} y z_{ci} son las coordenadas del punto i -ésimo de la trayectoria programada.

- x_{ij} , y_{ij} y z_{ij} son las coordenadas de la intersección de la trayectoria alcanzada j -ésima y el plano normal i -ésimo.

- *Precisión de la orientación de la trayectoria*: Es la diferencia entre las orientaciones programadas y el promedio de las orientaciones alcanzadas.

Las precisiones en la orientación de la trayectoria AT_a , AT_b y AT_c se definen como la desviación máxima respecto a la orientación programada a lo largo de la trayectoria:

$$AT_a = \text{máx. } |\bar{a}_i - a_{ci}| \quad i = 1 \dots m$$

$$AT_b = \text{máx. } |\bar{b}_i - b_{ci}| \quad i = 1 \dots m$$

$$AT_c = \text{máx. } |\bar{c}_i - c_{ci}| \quad i = 1 \dots m$$

donde

$$\bar{a}_i = \frac{l}{n} \sum_{j=1}^n a_{ij}$$

$$\bar{b}_i = \frac{l}{n} \sum_{j=1}^n b_{ij}$$

$$\bar{c}_i = \frac{l}{n} \sum_{j=1}^n c_{ij}$$

a_{ci} , b_{ci} y c_{ci} son las orientaciones programadas en el punto (x_{ci}, y_{ci}, z_{ci}) .

a_{ij} , b_{ij} y c_{ij} son las orientaciones alcanzadas en el punto (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) .

La siguiente tabla resume las condiciones del ensayo para la precisión en la trayectoria.

Carga	Velocidad	Posiciones	Número de ciclos
100% de la carga	100% de la velocidad 50% de la velocidad 10% de la velocidad	Trayectoria lineal E ₁ – E ₃ Trayectorias circulares Ciclos grande y pequeño	10
La masa de la carga reducida al 10% (opcional)	100% de la velocidad 50% de la velocidad 10% de la velocidad		

Tabla. 4.10 - Resumen de las condiciones en el ensayo de la precisión en la trayectoria

- Mientras los cálculos de la precisión de la trayectoria se realizan en planos ortogonales a la trayectoria programada, las mediciones de la trayectoria alcanzada se pueden llevar a cabo como función de la distancia o del tiempo.
- Los puntos programados de inicio y final del ciclo no deben pertenecer a la trayectoria escogida para el ensayo.

4.2.3) Repetibilidad de la trayectoria (RT)

Expresa el grado de proximidad entre las trayectorias alcanzadas para una misma trayectoria programada repetida n veces.

Para una trayectoria dada seguida n veces en la misma dirección, la repetibilidad de la trayectoria se expresa por:

- RT_p es el máximo RT_{pi} que es igual al radio de un círculo en el plano normal con su centro en la línea del baricentro (véase figura 4.14).
- La máxima de las dispersiones de los ángulos respecto al valor medio en los diferentes puntos calculados.

La repetibilidad en la trayectoria se calcula como sigue:

$$RT_p = \max. RT_{pi} = \max. [\bar{l}_i + 3S_{li}] \quad i = 1 \dots m$$

donde

$$\bar{l}_i = \frac{l}{n} \sum_{j=1}^n l_{ij}$$

$$S_{\bar{l}_i} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_{ij} - \bar{l}_i)^2}{n-1}}$$

$$l_{ij} = \sqrt{(x_{ij} - \bar{x}_i)^2 + (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 + (z_{ij} - \bar{z}_i)^2}$$

con las diferentes variables definidas en el apartado 4.2.2

$$RT_a = \text{máx. } 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (a_{ij} - \bar{a}_i)^2}{n-1}} \quad i = 1 \dots m$$

$$RT_b = \text{máx. } 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (b_{ij} - \bar{b}_i)^2}{n-1}} \quad i = 1 \dots m$$

$$RT_c = \text{máx. } 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - \bar{c}_i)^2}{n-1}} \quad i = 1 \dots m$$

con las variables definidas en el apartado 4.2.2.

La repetibilidad en la trayectoria se debe determinar aplicando el mismo procedimiento de ensayo utilizado para la medición de la precisión de la trayectoria.

Para aplicaciones especiales RT puede expresarse por sus componentes RT_x , RT_y y RT_z .

4.2.4) Precisión de la trayectoria en la reorientación

Para conocer la influencia de las alteraciones tri-direccionales en la orientación de una trayectoria lineal de forma simple, es decir, con la medición únicamente de la precisión en el posicionamiento de la trayectoria (AT_p), debe aplicarse el siguiente ensayo, tal como se ilustra en la figura 4.15.

a) Definición de la alteración en la orientación alrededor de Y_n

B_n – ángulo en P_6 (inicio) + 30°

B_n – ángulo en P_6 a P_1 - 30°

B_n – ángulo en P_1 a P_9 + 30°

b) Definición de la alteración en la orientación alrededor de X_n y Z_n

A_n – ángulo en P_6 (inicio) + 30°

A_n – ángulo en P_6 a P_7 0°

C_n – ángulo en P_7 a P_1 - 30°

C_n – ángulo en P_1 a P_8 0°

A_n – ángulo en P_8 a P_9 - 30°

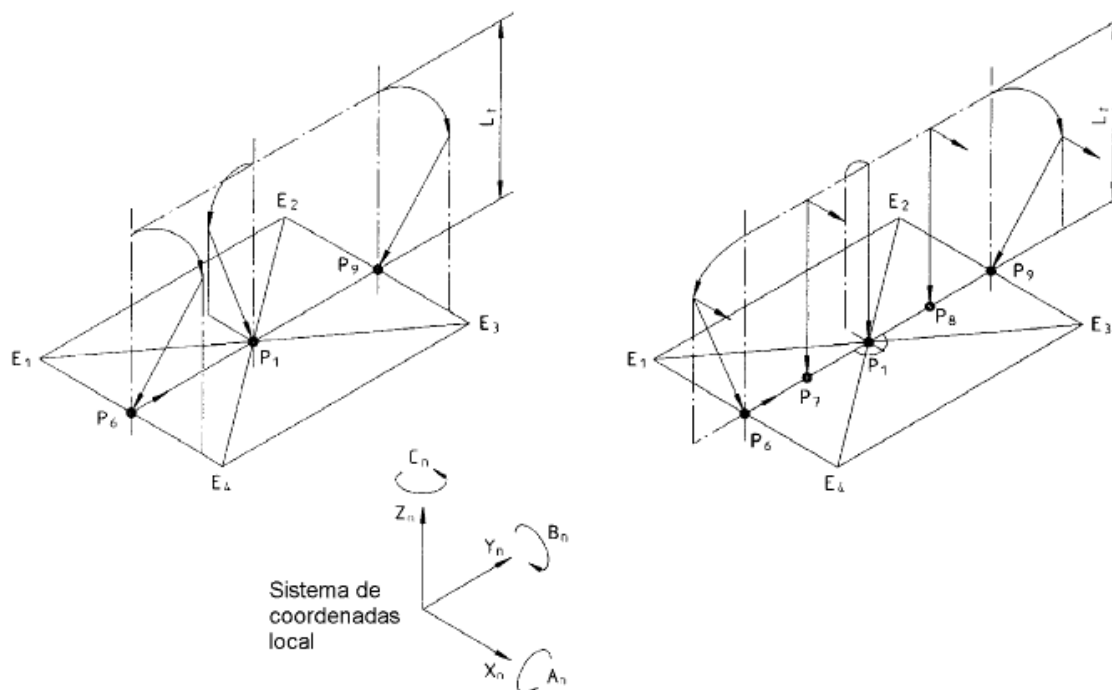


Fig. 4.15 - Definición de alteraciones de la orientación; a) alrededor del eje y_n b) alrededor de los ejes x_n y z_n

En el plano de ensayo $E_1...E_4$, se marcarán puntos adicionales $P_6...P_9$, de forma equidistante uno a otro. Se debe disponer de un sistema de coordenadas local para la definición de las orientaciones entre el plano $X_n Y_n$ paralelo al plano seleccionado $E_1...E_4$ y la trayectoria lineal $P_6...P_9$ paralela al eje Y_n .

La trayectoria se debe seguir con una velocidad constante del TCP, desde el punto de inicio P_6 al P_9 y volver del P_9 al P_6 . La orientación debe hacerse continuamente en las áreas descritas en la figura 4.15, sin parar en los puntos $P_6...P_9$. La velocidad y la carga deben estar en concordancia con el apartado 4.2.2, véase en la tabla 4.11.

La precisión de la trayectoria en reorientación debe calcularse de forma similar a la precisión de la trayectoria como se define en el apartado 4.2.2.

La siguiente tabla resume las condiciones del ensayo para la precisión de la trayectoria en la reorientación.

Carga	Velocidad	Posiciones	Número de ciclos
100% de la carga	100% de la velocidad 50% de la velocidad 10% de la velocidad	Trayectoria lineal	10
La masa de la carga reducida al 10% (opcional)	100% de la velocidad 50% de la velocidad 10% de la velocidad		

Tabla. 4.11 - Resumen de las condiciones del ensayo para la precisión de la trayectoria en la reorientación

4.2.5) Desviaciones en esquina

La desviación en esquina puede clasificarse en dos tipos:

- Esquinas afiladas
- Esquinas redondeadas

Para conseguir que el robot realice un movimiento en L (esquina afilada) son necesarios unos cambios de velocidad para mantener el control preciso de la trayectoria. Esto implica normalmente unas grandes fluctuaciones en la velocidad. Para mantener la velocidad constante se requiere redondear la trayectoria en la esquina.

Las esquinas afiladas se consiguen cuando el robot se mueve desde una trayectoria y, con una velocidad constante y sin trayectorias intermedias, se pasa a otra trayectoria ortogonal a la primera.

Las variaciones de velocidad en las esquinas dependen del tipo de sistema de control, y se debe registrar (en algunos casos la reducción puede ser cercana al 100% de la velocidad aplicada en el ensayo).

Las esquinas redondeadas se utilizan para prevenir reboses considerables y para mantener las tensiones mecánicas bajo ciertos límites. Dependiendo de los sistemas de control se pueden programar trayectorias discretas tales como radios o funciones esplines (métodos de suavizado) mientras que en otros casos se generan automáticamente. En este caso la reducción de la velocidad no es deseable y si no se especifica otra cosa, esta reducción está limitada, como máximo, a un 5% de la velocidad aplicada en el ensayo.

Si se utiliza un método de suavizado en la programación, se debe especificar en el informe del ensayo.

4.2.5.1) Error al doblar una esquina (CR): Se define como el máximo valor calculado de tres ciclos de mediciones consecutivas. Para cada ciclo la mínima distancia entre el punto esquina (x_e, y_e, z_e en la figura 4.16) y la trayectoria alcanzada se calcula como sigue:

$$CR = \text{máx. } CR_j \quad j = 1, 2, 3$$

$$CR_j = \min. \sqrt{(x_i - x_e)^2 + (y_i - y_e)^2 + (z_i - z_e)^2} \quad i = 1 \dots m$$

donde

x_e, y_e y z_e son las coordenadas del punto de esquina programado

x_i, y_i y z_i son las coordenadas del punto esquina programado en la trayectoria alcanzada correspondiente al punto medio i .

4.2.5.2) Rebose de esquina (CO): Se define como el máximo valor calculado de tres ciclos de medidas consecutivos. Para cada ciclo se mide la máxima desviación de la trayectoria programada después que el robot haya iniciado la segunda trayectoria consecutivamente y con la velocidad constante.

Si la segunda trayectoria programada se define como el eje Z y la primera en la dirección Y negativa, el rebose de esquina se calcula:

$$CO = \text{máx. } CO_j \quad j = 1, 2, 3$$

$$CO_j = \text{máx. } \sqrt{(x_i - x_{ci})^2 + (y_i - y_{ci})^2} \quad i = 1 \dots m$$

donde

x_{ci} e y_{ci} son las coordenadas del punto en la trayectoria programada correspondientes al punto de medida z_{ci}

x_i e y_i son las coordenadas del punto en la trayectoria alcanzada correspondientes al punto medido z_i

Esta ecuación es sólo verdadera cuando $(y_i - y_{ci})$ tiene un valor positivo. Si $(y_i - y_{ci})$ tiene un valor negativo, no existe un rebose de esquina.

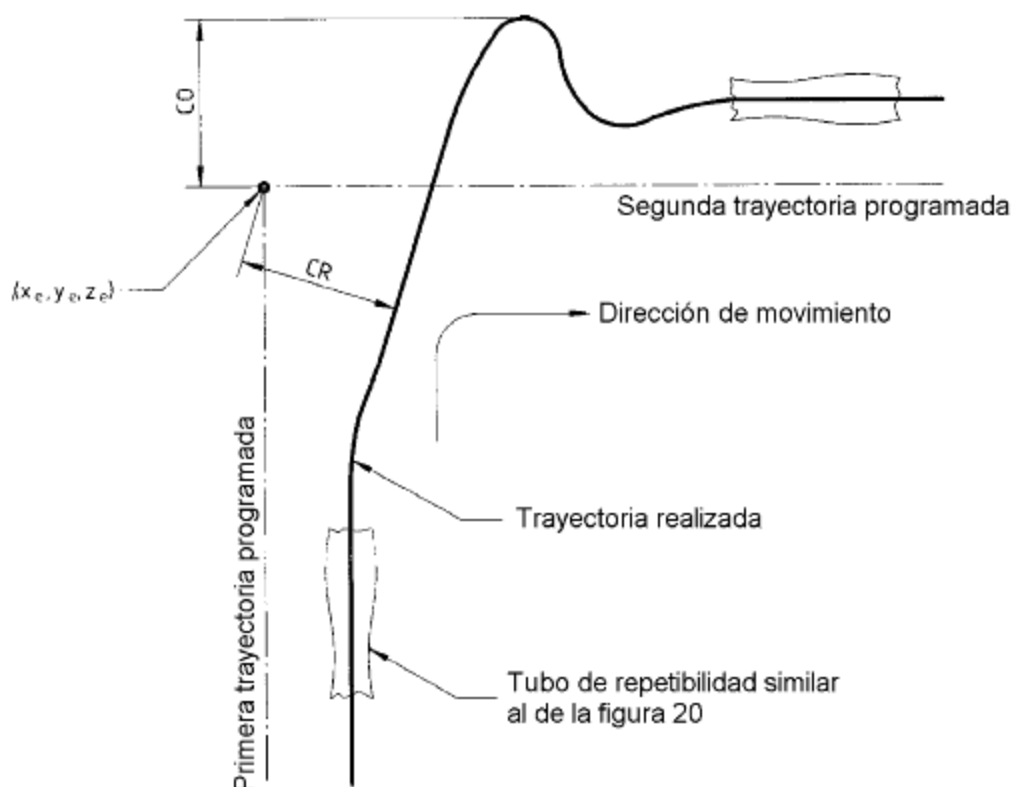


Fig. 4.16 - Rebose de esquina y error al doblar una esquina en una esquina afilada

4.2.5.3) Condiciones generales del ensayo: La siguiente tabla resume las condiciones del ensayo para las desviaciones de esquina.

Carga	Velocidad	Posiciones	Número de ciclos
100% de la carga	100% de la velocidad 50% de la velocidad 10% de la velocidad	$E_1 - E_2 - E_3 - E_4$	3

Tabla. 4.12 - Resumen de las condiciones de ensayo para las desviaciones de esquina

La posición inicial debe estar a medio camino entre E_1 y E_4 . Se deben medir las cuatro esquinas. Se debe programar una trayectoria continua para programar la trayectoria rectangular. Cualquier reducción automática de la velocidad mientras se ejecuta la trayectoria debe ser la especificada por parte del fabricante y debe aparecer en el informe del ensayo.

Si no se especifica lo contrario la orientación es ortogonal al plano de la trayectoria rectangular.

El rebose en la esquina se puede calcular midiendo la desviación de la trayectoria programada y cada trayectoria medida. Para establecer los valores de la trayectoria

programada se puede medir la posición de los puntos de la esquina durante el guiado, en el caso de programación por guiado, o conocerlos en el caso de la introducción de los datos manualmente.

Deben medirse ambos criterios CR y CO en la misma secuencia de medida. Se debe informar de cualquier alternativa de programación.

4.2.6) Características de la velocidad en la trayectoria

4.2.6.1) Descripción general: Las características de funcionamiento de un robot respecto a la velocidad de la trayectoria se dividen en tres criterios. Estos son:

- Precisión de la velocidad de la trayectoria (AV)
- Repetibilidad de la velocidad de la trayectoria (RV)
- Fluctuación en la velocidad de la trayectoria (FV)

En la figura 4.17 se muestra un gráfico idealizado de estos criterios.

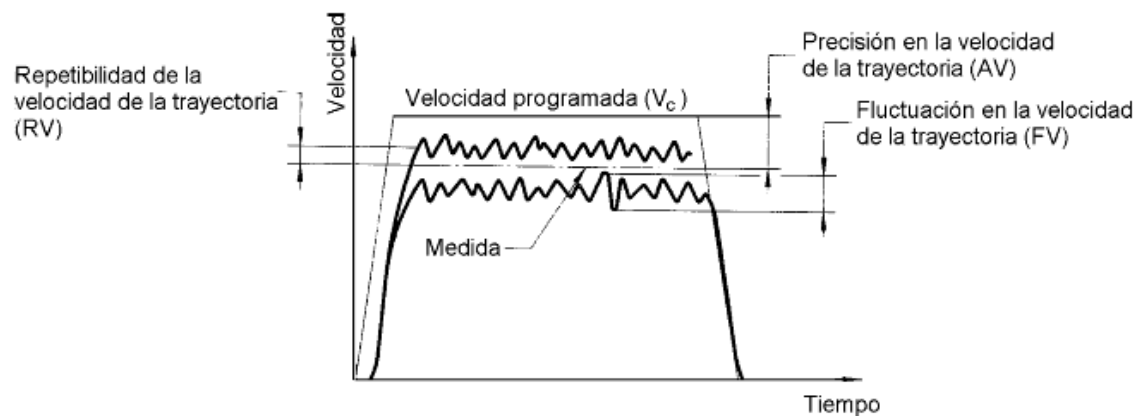


Fig. 4.17 - Características de la velocidad de la trayectoria

La siguiente tabla resume las condiciones del ensayo para las características de la velocidad de la trayectoria.

Carga	Velocidad	Número de ciclos
100% de la carga	100 % de la velocidad	10
	50 % de la velocidad	
	10 % de la velocidad	
La masa de la carga reducida al 10% (opcional)	100 % de la velocidad	10
	50 % de la velocidad	
	10 % de la velocidad	

Tabla. 4.13 - Resumen de las condiciones del ensayo para las características de la velocidad de la trayectoria

En el caso de que existan fluctuaciones de velocidad importantes a lo largo de la trayectoria, se pueden referir al mismo punto varias mediciones repetidas realizadas como función del tiempo a lo largo de la trayectoria programada.

Las mediciones deben realizarse durante el periodo de velocidad estable en el centro de la trayectoria del ensayo y en el 50% de la longitud.

Las características de la velocidad en la trayectoria se ensayan en la misma trayectoria lineal que se ha utilizado para determinar la precisión de la trayectoria (véase el apartado 4.2.2). Se calculan AV , RV y FV con $n = 10$.

4.2.6.2) Precisión en la velocidad de la trayectoria (AV): Se define como el error entre la velocidad programada y el valor medio de las velocidades alcanzadas durante n travesías a lo largo de la trayectoria y se expresa como un porcentaje de la velocidad programada. La precisión en la velocidad de la trayectoria se calcula como sigue:

$$AV = \frac{\bar{v} - v_c}{v_c} \times 100$$

donde

$$\bar{v} = \frac{l}{n} \sum_{j=1}^n \bar{v}_j$$

$$\bar{v}_j = \frac{l}{m} \sum_{i=1}^m \bar{v}_{ij}$$

donde

v_c es la velocidad programada

v_{ij} es la velocidad alcanzada para la medida i -ésima y la repetición j -ésima

m es el número de medidas a lo largo de un camino

4.2.6.3) Repetibilidad de la velocidad de la trayectoria (RV): Es la medida de la dispersión entre las velocidades alcanzadas y la velocidad programada. La repetibilidad en la velocidad de la trayectoria se debe representar como un porcentaje de la velocidad programada.

$$RV = \pm \left(\frac{3S_v}{v_c} \times 100 \right)$$

donde

$$S_v = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\bar{v}_j - \bar{v})^2}{n-1}}$$

con las variables definidas en el apartado 4.2.6.2.

La repetibilidad de la velocidad de la trayectoria debe medirse usando el mismo procedimiento que el ensayo utilizado para medir la precisión en la velocidad de la trayectoria.

4.2.6.4) Fluctuaciones en la velocidad de la trayectoria (FV): Es la desviación máxima en la velocidad durante un trayecto con una velocidad programada.

La fluctuación de la velocidad de la trayectoria se define como el máximo de las fluctuaciones de la velocidad para cada trayecto. Se calcula como sigue:

$$FV = \max. \left[\max_{i=1}^m (v_{ij}) - \min_{i=1}^m (v_{ij}) \right] \quad j = 1 \dots n$$

con las variables definidas en el apartado 4.2.6.2.

La fluctuación en la velocidad de la trayectoria debe medirse usando el mismo procedimiento que el utilizado para la medida de la precisión de la velocidad de la trayectoria.

4.3) TIEMPO MÍNIMO DE POSICIONAMIENTO

El tiempo de posicionamiento es el tiempo entre la “salida desde” y la “llegada al” estado estacionario cuando se recorre una distancia predeterminada y/o moviéndose a través de un ángulo determinado bajo un control punto a punto. El tiempo necesario para que el robot se estabilice en un punto alcanzado, tal como se define en el apartado 4.1.4, está incluido en el tiempo mínimo de posicionamiento.

A menos que se diga lo contrario el robot debe alcanzar las características de precisión y repetibilidad de posición especificadas cuando realiza movimientos entre posiciones de ensayo en un tiempo de posicionamiento mínimo especificado.

El tiempo de posicionamiento es una función no-lineal de la distancia recorrida.

El tiempo de posicionamiento de un robot contribuye a la determinación del tiempo de ciclo, pero no es el único factor que influye. Así pues el resultado de las mediciones del tiempo de posicionamiento se puede utilizar para dar una indicación del tiempo de ciclo pero no puede usarse para calcular el tiempo de ciclo directamente.

La carga del interfaz mecánico y las velocidades durante el ensayo son las mismas que para las características de posición.

Las velocidades que tienen que utilizarse para el ensayo son el 100% de la velocidad y además el ensayo debe realizarse con las velocidades optimizadas para cada parte del ciclo para conseguir un tiempo de posicionamiento corto. Las velocidades utilizadas deben mencionarse en el informe del ensayo.

El número de ciclos es de tres.

Las tablas 4.14 y 4.15 resumen las condiciones del ensayo para el tiempo mínimo de posicionamiento.

Posiciones	P ₁	P ₁₊₁	P ₁₊₂	P ₁₊₃	P ₁₊₄	P ₁₊₅	P ₁₊₆	P ₁₊₇
Distancia con respecto a la posición anterior (D _x = D _y = D _z)	0	- 10	+ 20	- 50	+ 100	- 200	+ 500	- 1 000

Tabla. 4.14 - Posiciones y distancias para el tiempo mínimo de posicionamiento

Carga	Velocidad	Posiciones	Número de ciclos
100% de la carga	100% de la velocidad Velocidad optimizada	$P_1 - P_{1+1} - P_{1+2} - P_{1+3} -$ $P_{1+4} - P_{1+5} - P_{1+6} - P_{1+7}$	3
La masa de la carga reducida al 10% (opcional)	100% de la velocidad Velocidad optimizada		3

Tabla. 4.15 - Resumen de las condiciones del ensayo para el tiempo mínimo de posicionamiento

- Con el fin de incluir distancias cortas en la medida del tiempo de posicionamiento, se programan un número de posiciones o se guía al robot a lo largo de la diagonal del cubo. Las componentes de la distancia $D_x = D_y = D_z$ entre posiciones consecutivas siguen una progresión alterna como se muestra en la tabla 4.14. Véase también la figura 4.18.

- El número de posiciones y distancias depende del tamaño del cubo seleccionado.

- Para cada recorrido, se calcula el valor medio de los tres ciclos y el resultado se da en una tabla, indicando la distancia entre posiciones.

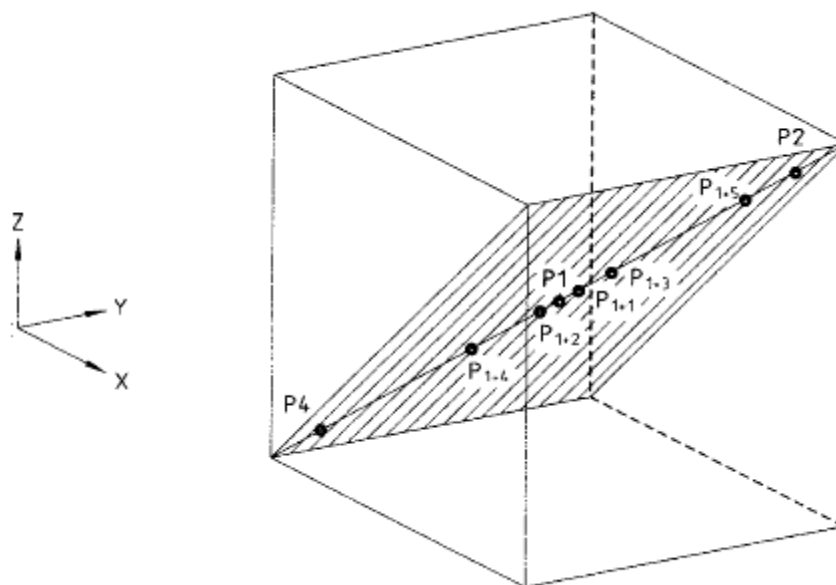


Fig. 4.18 - Ilustración del ciclo

4.4) COMPORTAMIENTO ESTÁTICO

El comportamiento estático es el máximo desplazamiento por unidad de carga aplicada. Se debería aplicar la carga y medir el desplazamiento en el interfaz mecánico.

El desplazamiento estático se debería especificar en milímetros por newton, relativo al sistema de referencia base.

Las fuerzas utilizadas en el ensayo deben aplicarse en las tres direcciones tanto positivas como negativas, paralelamente a los ejes del sistema de coordenadas base.

Las fuerzas deben incrementarse, para cada dirección, de forma discreta en tramos de 10% de carga hasta el 100% cada vez en una dirección. Para cada fuerza y dirección se mide su correspondiente desplazamiento.

Las mediciones se deben hacer con los servos activados y los frenos desactivados.

El procedimiento de medición se repite tres veces para cada dirección. Este ensayo se hace con el centro del interfaz mecánico ubicado en P_1 .

4.5) CRITERIOS DE COMPORTAMIENTO EN APLICACIONES ESPECÍFICAS

4.5.1) Desviaciones de ensayo ondulante/ de ondulación

Las características de funcionamiento de un robot con respecto a las desviaciones de ondulación se dividen en dos criterios. Estos son:

- Error de trazo en la ondulación (WS)
- Error de frecuencia en la ondulación (WF)

La ondulación es la combinación de uno o más movimientos superpuestos en una trayectoria, básicamente usados para el soldeo con arco.

4.5.1.1) Trayectoria ondulante: La trayectoria definida en la figura 4.19 es una onda de diente de sierra con una amplitud programada S_c y una longitud de onda de WD_c generada por una frecuencia programada F_c , ambas definidas por el fabricante. Al menos deben haber 10 longitudes de onda en el plano seleccionado.

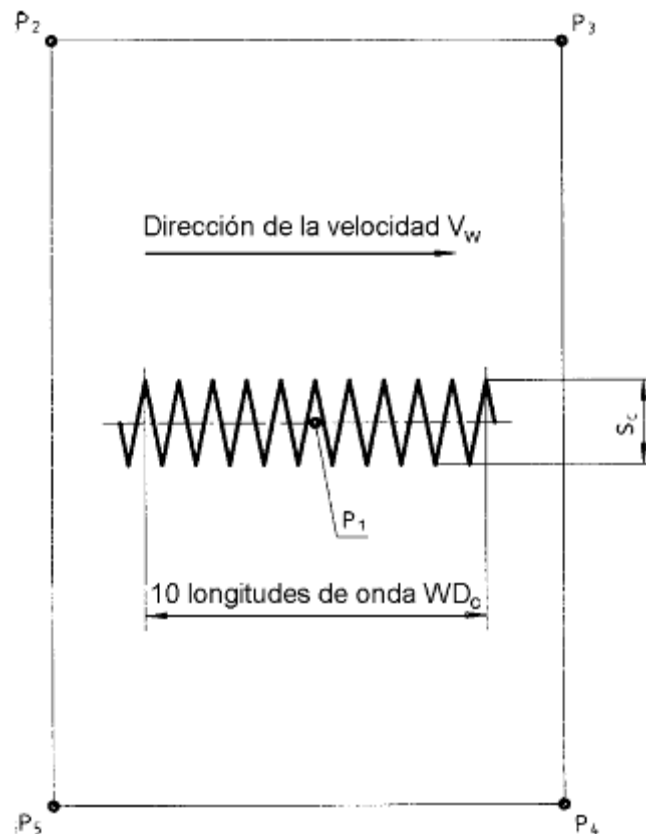


Fig. 4.19 - Ensayo de trayectoria de ensayo ondulante / de ondulación en el plano seleccionado

4.5.1.2) Error de amplitud de ondulación (WS): El error de amplitud de ondulación, en porcentaje, debe calcularse a partir de la diferencia entre la amplitud S_c de la onda programada y la amplitud medida media alcanzada S_a (véase figura 4.20), según sigue:

$$WS = \frac{S_a - S_c}{S_c} \times 100(\%)$$

4.5.1.3) Error en la frecuencia de ondulación (WF): El error de frecuencia de ondulación, en porcentaje, debe calcularse a partir de la diferencia entre la frecuencia F_c de la onda programada y la frecuencia F_a conseguida según sigue:

$$WF = \frac{F_a - F_c}{F_c} \times 100(\%)$$

donde

$$F_a = 10 \times \frac{WV_a}{10 WD_a} \text{ y } F_c = 10 \times \frac{WV_c}{10 WD_c}$$

con

WV_c = velocidad programada de ondulación

WV_a = velocidad obtenida de ondulación

WD_c = distancia programada de ondulación

WD_a = distancia media obtenida de ondulación

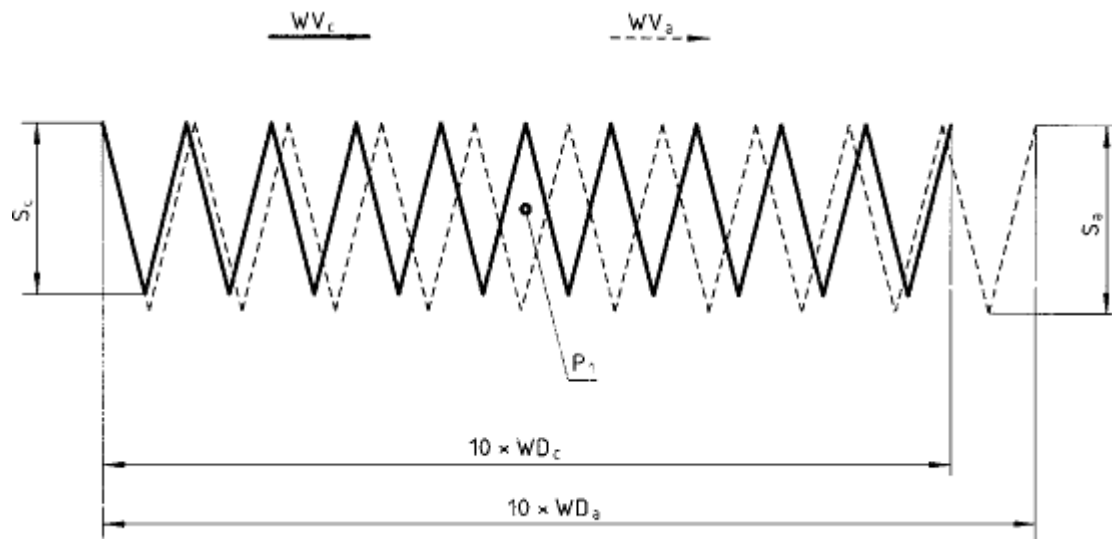


Fig. 4.20 - Ilustración de una trayectoria ondulada programada y otras alcanzadas

5) PROGRAMACIÓN DE MOVIMIENTO

El programador controla los movimientos del robot industrial con la ayuda de instrucciones de movimiento especiales.

Según el tipo de control, estas instrucciones de movimiento pueden subdividirse en instrucciones para movimientos simples de punto a punto y en instrucciones para movimientos de trayectoria. Mientras que en los movimientos de trayectoria, el efector final describe una trayectoria geométrica exactamente definida en el espacio, en los movimientos de punto a punto, la trayectoria de movimiento depende de la cinemática del robot y por ello no es exactamente previsible. Ambos tipos de movimientos tienen en común, que la programación se efectúa desde la posición actual a una nueva posición. Por lo tanto, en una instrucción de movimiento solamente es necesario indicar la posición destino.

Las coordenadas de las posiciones pueden especificarse textualmente mediante la introducción de valores numéricos o mediante el desplazamiento con el robot hasta el punto en el espacio y la memorización de los valores actuales.

Otras propiedades de movimiento pueden ser ajustadas por medio de variables del sistema.

5.1) UTILIZACIÓN DE DIFERENTES SISTEMAS DE COORDENADAS

Para poder indicar en el espacio la posición u orientación de un punto, se utilizan diferentes sistemas de coordenadas. Puede efectuarse una diferenciación básica entre el sistema de coordenadas específico del eje y cartesiano:

- *Sistema de coordenadas específico del eje*: Se indican los corrimientos (para los ejes de traslación) o giros (para los ejes rotatorios) de cada eje del robot. En un robot de brazo articulado de 6 ejes, deben indicarse los 6 ángulos de articulaciones del robot, para especificar unívocamente la posición y la orientación (véase figura 5.1)

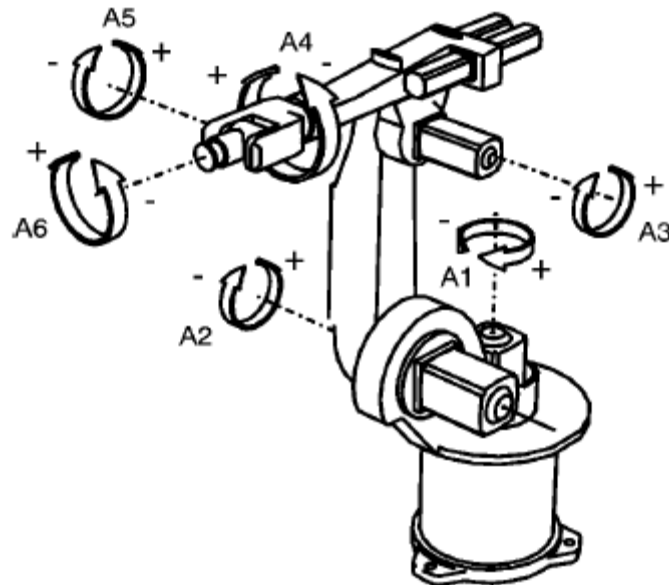


Fig. 5.1 - Sistema de coordenadas específico del eje de un robot de brazo articulado de 6 ejes

La descripción de una posición específica del eje se efectúa en la KR C... mediante el tipo de estructura predefinida AXIS, cuyos componentes tienen el significado de los ángulos o longitudes según el tipo de eje.

Las posiciones específicas de los ejes solamente pueden alcanzarse en combinación con los pasos de movimiento PTP. Si un movimiento de trayectoria se programa con una posición de robot específica del eje, esto da lugar a fallo.

La unidad de control ofrece varios sistemas de coordenadas cartesianos para la programación, cuyas coordenadas, antes de la ejecución del movimiento, se transforman automáticamente en el sistema específico del eje (véase figura 5.2).

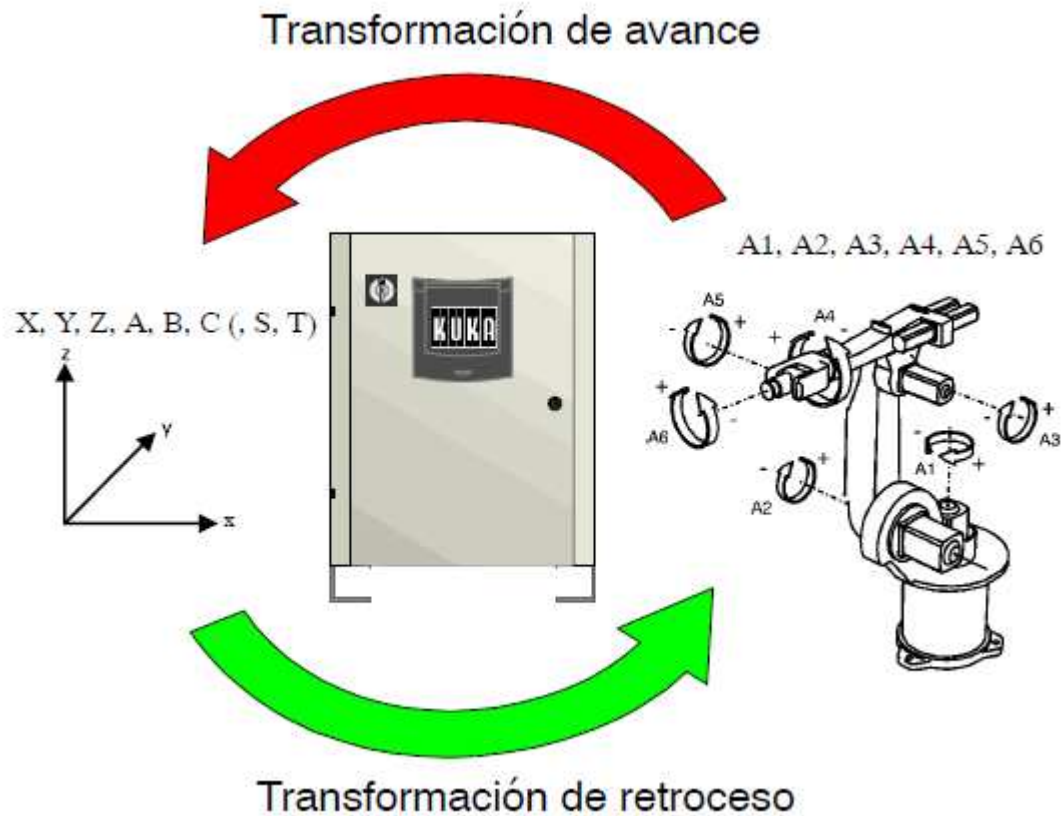


Fig. 5.2 - Transformación de coordenadas

- *Sistema de coordenadas cartesiano*: Los tres ejes de coordenadas X, Y y Z se encuentran perpendiculares unos respecto a otros y forman, en este orden, un sistema rectangular.

La posición de un punto en el espacio está determinada unívocamente en el sistema de coordenadas cartesiano mediante la indicación de las coordenadas X, Y y Z. Estas se obtienen de las distancias translatorias de cada valor de coordenadas hacia el origen de las coordenadas (véase figura 5.3).

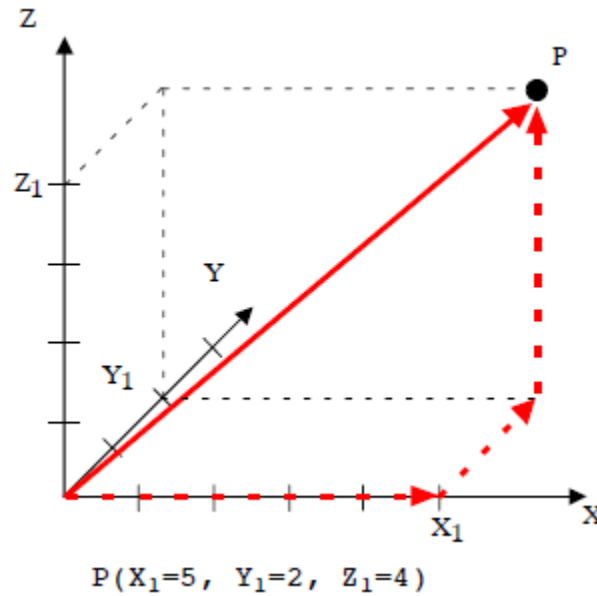


Fig. 5.3 - Descripción translatoria de la posición de un punto

Los ángulos denominados en el KR C... con A, B y C, describen giros en torno a los ejes de coordenadas Z, Y y X. Para ello, debe mantenerse el orden de las rotaciones:

- 1.- Giro en torno al eje Z en el ángulo A
- 2.- Giro en torno al nuevo eje Y en el ángulo B
- 3.- Giro en torno al nuevo eje X en el ángulo C

Este orden de giro corresponde a los ángulos roll-pitch-yaw (rodar-cabecear-oscilar). El ángulo C corresponde al rodar, el ángulo B al cabecear y el ángulo A al oscilar (véase figura 5.4).

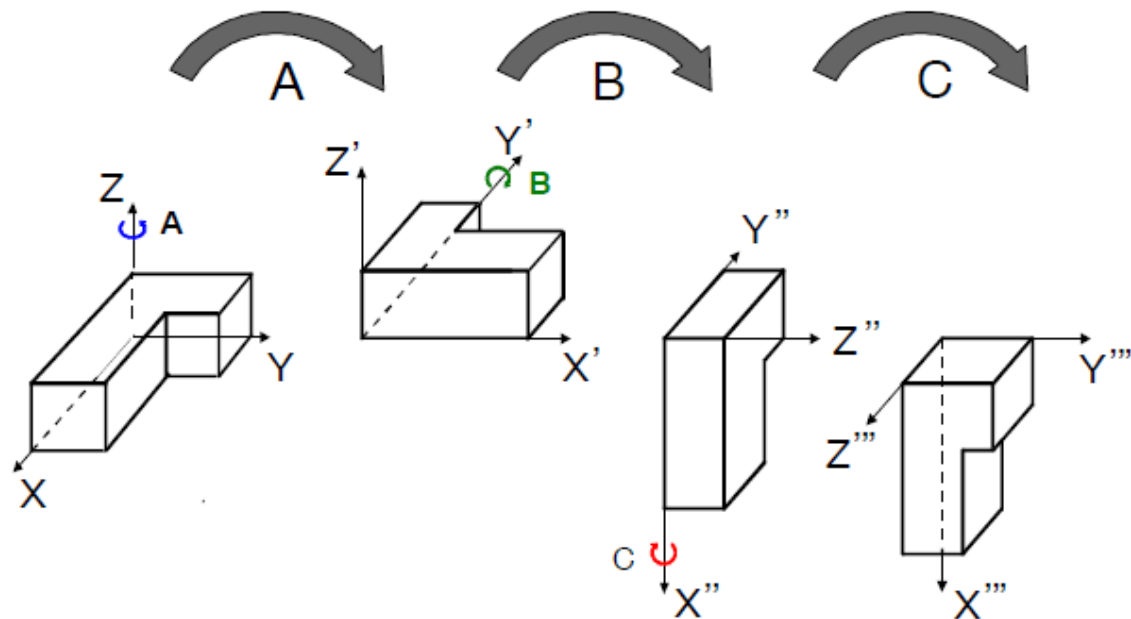


Fig. 5.4 - Descripción por medio de las rotaciones de la orientación de un punto

Con las translaciones X, Y y Z, y con las rotaciones A, B y C puede describirse unívocamente la posición y orientación de un punto en el espacio. En la KR C..., esto se produce con la estructura predefinida FRAME.

Para los movimientos de trayectoria, la indicación de las coordenadas FRAME es siempre unívoca y suficiente. Sin embargo, en el desplazamiento punto a punto, con determinadas cinemáticas de robots puede alcanzarse uno y el mismo punto en el espacio con varias posiciones de eje. Con los dos datos "S" y "T", puede solucionarse esta ambigüedad. En la KR C... está prevista la estructura POS para un frame ampliado con "S" y "T".

En la KR C... están predefinidos los siguientes sistemas de coordenadas cartesianos (véase tabla 5.1 y figura 5.5):

Sistema de coordenadas	Variable del sistema	Estado
Sistema de coordenadas universal	\$WORLD	protegida contra escritura
Sistema de coordenadas del robot	\$ROBROOT	protegida contra escritura (modificable en R1\MADA\MACHINE.DAT)
Sistema de coordenadas de la herramienta	\$TOOL	a describir
Sistema de coordenadas base (de la pieza)	\$BASE	a describir

Tabla 5.1 - Sistemas de coordenadas predefinidos

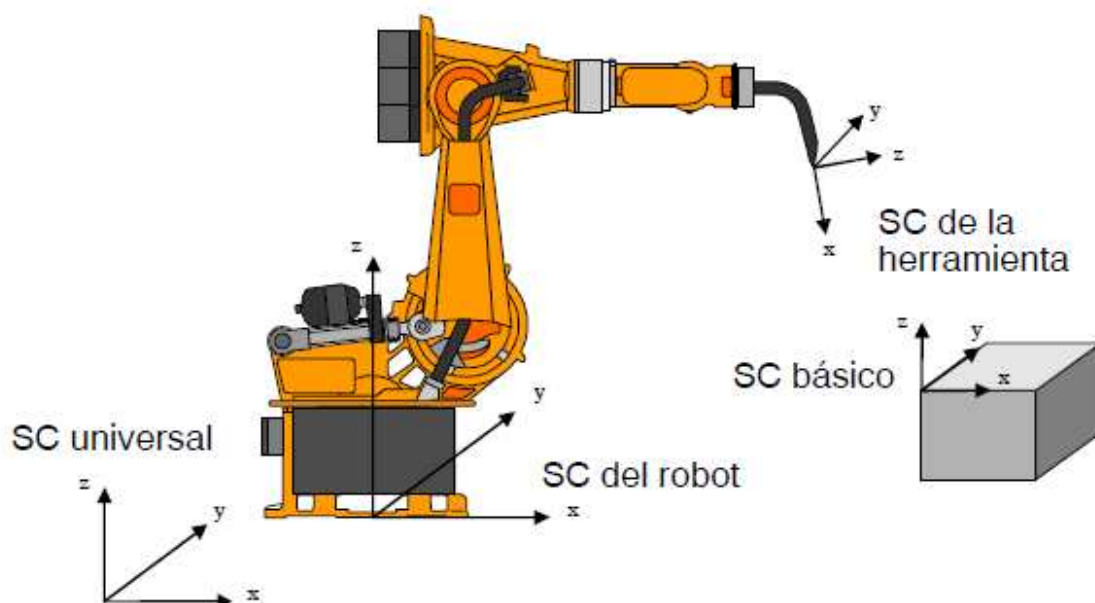


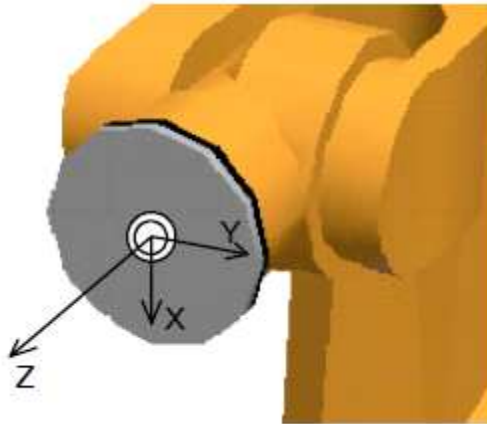
Fig. 5.5 - Sistemas de coordenadas cartesianos para robots

1. Sistema de coordenadas universal: Es un sistema de coordenadas fijo en un lugar y que sirve como sistema de coordenadas genérico para un sistema de robot. De este modo, representa el sistema de referencia tanto para el sistema de robot como también para los periféricos de la célula.

2. Sistema de coordenadas del robot: Se encuentra en el pie del robot y sirve como sistema de coordenadas de referencia para la estructura mecánica del robot. Con \$ROBROOT puede definirse un corrimiento del robot hacia \$WORLD.

3. Sistema de coordenadas de la herramienta: Tiene su origen en la punta de la herramienta. La orientación puede seleccionarse de modo tal, que su eje X sea idéntico con la dirección de avance de la herramienta. Con el movimiento de la punta de la herramienta, se mueve también el sistema de coordenadas de la herramienta.

En el suministro, el sistema de coordenadas de la herramienta se encuentra en la brida del robot. Se refiere, a través de la transformación, al sistema de coordenadas del robot. Como se puede observar en el detalle de abajo.



Si se efectúa un cambio de herramienta, después de la nueva medición, puede seguirse utilizando el programa original, ya que el ordenador conoce las coordenadas de la punta de la herramienta.

4. Sistema de coordenadas base: Se utiliza como sistema de referencia para la descripción de la posición de la pieza a trabajar. La programación del robot se efectúa en el sistema de coordenadas de la base. Utiliza el sistema de coordenadas universal. En el suministro del robot es

$$\$BASE=\$WORLD$$

Para la interpolación de la trayectoria de movimiento, la unidad de control del robot calcula normalmente la posición actual con referencia al sistema de coordenadas \$BASE (véase figura 5.6).

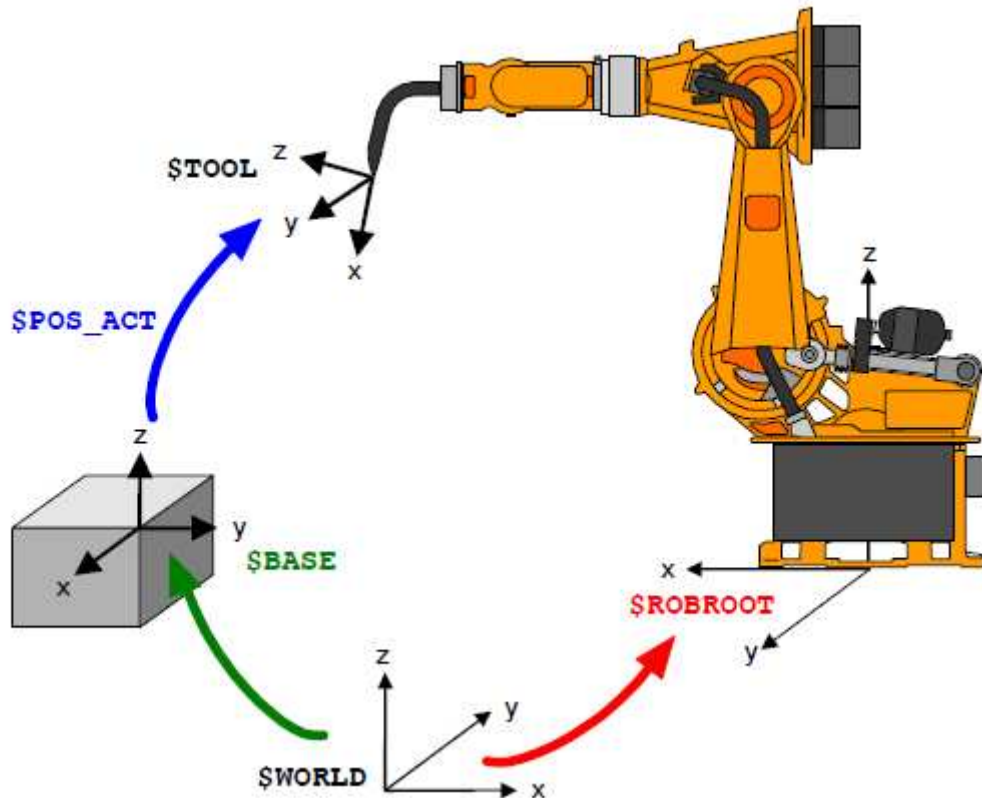


Fig. 5.6 - Cadena cinemática para la interpolación referida a la base

Sin embargo, en la práctica industrial, es cada vez más usual fijar la herramienta en el espacio y conducir la pieza a trabajar por medio de una garra adecuada a lo largo de la herramienta fija.

La variable \$TOOL hace referencia siempre a la herramienta o la pieza que se encuentra en el robot. Contrariamente a ello, la variable \$BASE se refiere siempre a una herramienta o pieza externa.

Dado que ahora pieza y herramienta intercambiaron su posición, pero el movimiento debe seguir referido a la pieza, la interpolación de la trayectoria del movimiento debe efectuarse entonces a través del sistema de coordenadas \$TOOL. Esta asignación del tipo de interpolación se efectúa en forma implícita en la utilización de un TCP normal o externo. Con las variables del sistema \$IPO_MODE puede Ud. definir este tipo de interpolación. La línea de programa

$$\$IPO_MODE = \#TCP$$

permite una interpolación referida a la garra en el sistema de coordenadas \$TOOL. La posición actual \$POS_ACT se calcula ahora en referencia a \$TOOL (véase figura 5.7). Con

$$\$IPO_MODE = \#BASE$$

define Ud. nuevamente el tipo de interpolación en la interpolación referida a la base para el caso normal. Este es también el ajuste al arrancar la unidad de control.

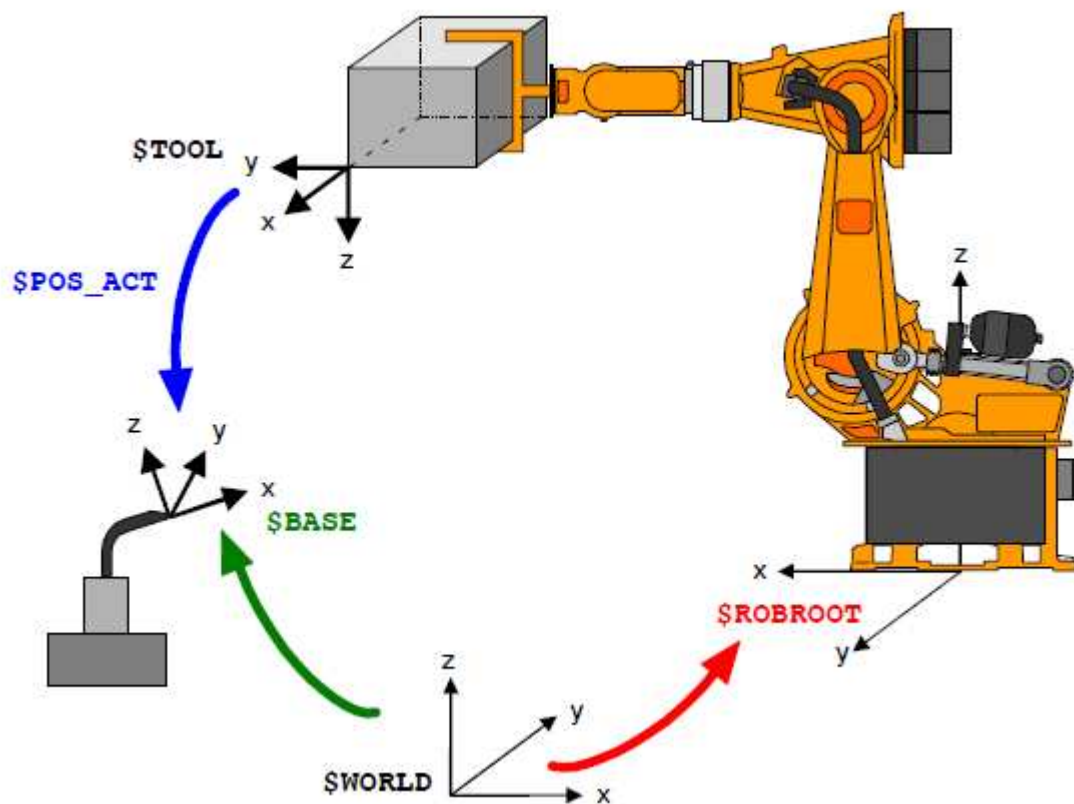


Fig. 5.7 - Cadena cinemática para la interpolación referida a la garra

5.2) MOVIMIENTOS PUNTO A PUNTO (PTP)

5.2.1) General (PTP sincrónico)

El movimiento punto a punto (PTP) es la posibilidad más rápida de mover la punta de la herramienta desde la posición actual hasta una posición destino programada. La unidad de control calcula para ello las diferencias de ángulo necesarias para cada eje.

Con la ayuda de la variable del sistema \$VEL_AXIS se programan las velocidades máximas específicas del eje, y con \$ACC_AXIS se programan las aceleraciones del eje máximas específicas.

Todos los datos se indican en porcentaje, en referencia a un valor máximo definido en los datos de la máquina.

Los movimientos de los ejes individuales se sincronizan para ello de forma que todos los ejes inician y finalizan simultáneamente el movimiento. Esto significa que sólo el eje con el recorrido más largo, el llamado eje guía, se desplaza con el valor límite programado para aceleración y velocidad. Todos los demás ejes se mueven solamente

con las aceleraciones y velocidades necesarias para alcanzar el punto final del movimiento en el mismo instante, independientemente de los valores programados en \$VEL_AXIS y \$ACC_AXIS.

Si la adaptación de aceleración o la característica de velocidad superior está activada, todos los ejes se encuentran al mismo tiempo en la fase de aceleración, de movimiento constante y de retardo.

El mando de los movimientos sincrónicos en tiempo disminuye la carga mecánica del robot, dado que los momentos de los motores y reductores de los ejes con trayectos de desplazamiento menor se reducen.

El mando de movimiento sincrónico de fases lleva a una trayectoria de movimiento, que independientemente de la velocidad y aceleración programada, siempre de igual ejecución en el espacio.

5.2.2) Perfil de marcha más elevado

En forma estándar, se utiliza un perfil de marcha más elevado para los movimientos PTP. Con este modelo en pasos PTP individuales y en pasos PTP con programación aproximada, el desplazamiento se efectúa desde el punto inicial al de destino optimizado en tiempo. Esto significa, que con los reductores y motores existentes no es posible desplazarse más rápidamente.

En todos los casos, la velocidad es adaptada de modo tal que en ningún momento se sobrepasan los momentos.

Una modificación de los valores de velocidad o de aceleración produce también, para las instrucciones de posicionamiento aproximado, sólo una modificación del perfil de la característica de velocidad en la trayectoria.

Las asignaciones de velocidad y los valores límites de las aceleraciones pueden ser definidas para cada eje de forma individual. Pero este valor límite no actúa directamente sobre la aceleración, sino sobre el momento de aceleración del eje.

5.2.3) Instrucciones de movimiento

Si al indicar las coordenadas de los ejes se omiten componentes individuales, el robot solamente desplaza los ejes indicados, mientras que los otros no cambian su posición. Con

PTP {A3 45}

por lo tanto, solamente se mueve el eje 3 hasta 45°. Debe tenerse en cuenta que para los datos angulares en la instrucción PTP, se trata de valores absolutos.

Para el desplazamiento relativo sirve la instrucción PTP_REL. Para girar también, por ejemplo, los ejes 1 y 4, 35° cada uno

PTP_REL {A1 35, A4 35}

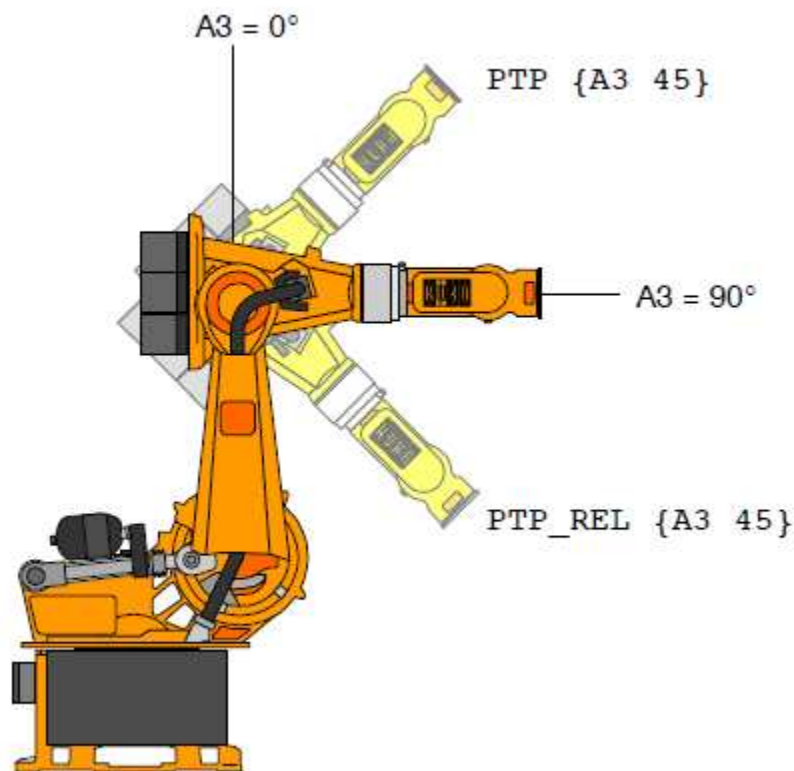


Fig. 5.9 - Diferencia entre las coordenadas absolutas y relativas específicas del eje

Para el desplazamiento relativo debe tenerse en cuenta que un movimiento detenido durante la ejecución de un programa, no puede continuarse de nuevo sin problemas. La unidad de control no puede tener en cuenta, después de un nuevo arranque y de una nueva selección de paso o un cambio del modo de ejecución del programa, el recorrido ya realizado y recorre de nuevo en forma completa la distancia relativa programada, lo que finalmente conduce a un punto final incorrecto.

El desplazamiento en las coordenadas específicas del eje es, en general poco práctico, ya que la persona piensa y actúa en espacio cartesiano. Para ello sirve la indicación de las coordenadas cartesianas por medio de una estructura POS.

Debe tenerse en cuenta ahora que al final en las coordenadas cartesianas, junto a los datos de velocidad y aceleración deben estar definidos obligatoriamente también el sistema de coordenadas base y el sistema de coordenadas de la herramienta.

En nuestro caso, el sistema de coordenadas base fue definido igual que el sistema de coordenadas universal, que de forma estándar, se encuentra en el pie del robot. El sistema de coordenadas de la herramienta fue ocupado con el frame cero, lo que significa, que todos los datos hacen referencia al punto central de la brida. El punto central de la herramienta se encuentra, por así decirlo, en el punto central de la brida. En el caso que una herramienta se encuentre montada sobre la brida, los valores tendrían que corregirse correspondientemente.

También en la indicación del punto final en las coordenadas cartesianas pueden omitirse aquí componentes individuales de los datos de geometría. La instrucción

$$\text{PTP } \{Z 1300, B 180\}$$

produce un movimiento del TCP en la dirección del eje Z a la posición absoluta 1300 mm. y un “cabeceo” del TCP de 180°.

Para el desplazamiento relativo del robot, se utiliza nuevamente la instrucción PTP_REL.

Con

$$\text{PTP_REL } \{Z 180, B -90\}$$

el robot puede retroceder de nuevo a su posición original.

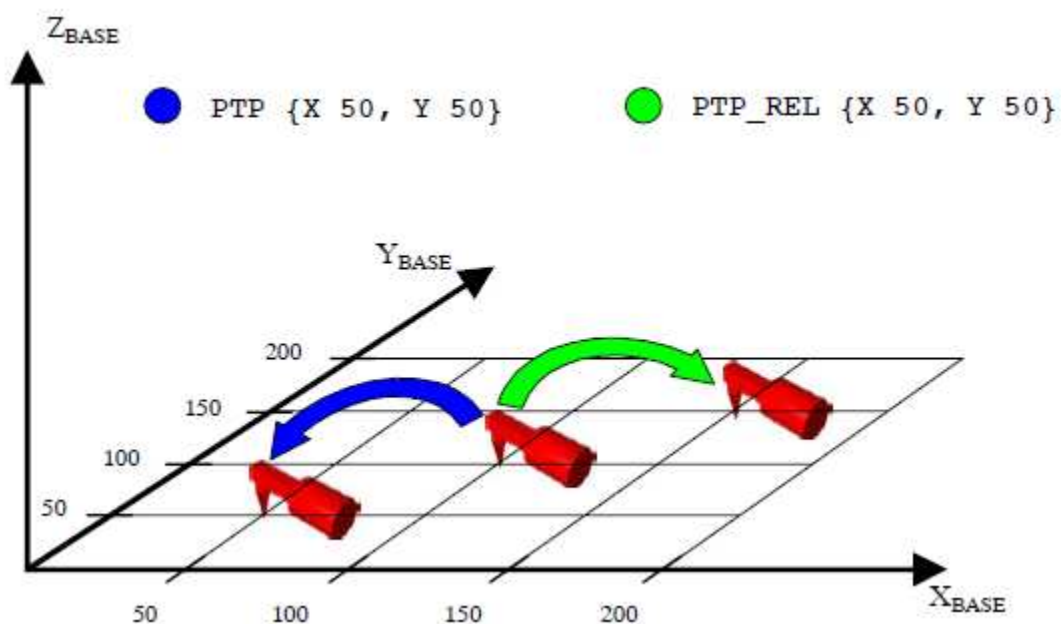


Fig. 5.10 - Diferencia entre las coordenadas cartesianas absolutas y relativas

Para las coordenadas cartesianas resulta posible ejecutar una combinación lógica del frame por medio del operado geométrico, directamente en la instrucción de movimiento. De este modo puede iniciarse, por ejemplo, un desplazamiento hacia el sistema de coordenadas base, sin modificar la variable \$BASE.

El corrimiento de la base con la ayuda del operador de dos puntos, tiene además una ventaja decisiva respecto a una nueva ocupación de \$BASE.

El corrimiento se efectúa en el paso de movimiento, mientras que una ocupación de \$BASE, debe producirse en cualquier momento antes del paso de movimiento. De este modo, está seleccionada siempre la base correcta para el movimiento también en caso de parada del programa y la selección de paso posterior.

\$BASE y \$TOOL deberían ocuparse solamente una vez, por ejemplo, en la parte de inicialización del programa. Pueden llevarse a cabo otros corrimientos con el operador geométrico.

Antes de que pueda procesarse un programa, en primer lugar, tiene que establecerse la coincidencia de paso, es decir, la coincidencia de la posición actual del robot con la posición programada. Dado que el movimiento de coincidencia de paso no representa ningún movimiento programado probado, debe llevarse a cabo manteniendo pulsada la tecla de arranque y con la velocidad automática reducida. Al alcanzar la trayectoria programada, el movimiento se detiene y el programa puede continuar al pulsar de nuevo la tecla de arranque.

En el modo de servicio “Automático externo” no se lleva a cabo ningún desplazamiento de coincidencia COI.

Por ello, como primera instrucción de movimiento, se recomienda un recorrido hasta la posición “Home”, en el que el robot se desplaza a una posición inicial no crítica y unívocamente definida en la que se crea también la coincidencia de paso. Al final del programa, el robot debería llevarse nuevamente a esta posición.

En una indicación POS, los datos “S” y “T” sirven para seleccionar una posición definida en forma unívoca de varias posiciones posibles del robot, para una y la misma posición en el espacio.

Para la primera instrucción de movimiento, en el caso de utilizar coordenadas cartesianas, es muy importante también programar “Status” y “Turn” para que se defina una posición inicial unívoca. Dado que para los movimientos de trayectoria “S” y “T” no se tienen en cuenta, en todos los casos la primera instrucción de movimiento de un programa debe ser una instrucción completa PTP con la indicación de “Status” (estado) y de “Turn” (giro).

En las siguientes instrucciones PTP pueden omitirse ahora los datos “S” y “T”, siempre que no sea necesaria una posición determinada del eje, por ejemplo, debido a obstáculos. El robot mantiene el valor de S antiguo y selecciona el nuevo valor T, con el cual resulta el recorrido axial más corto permitido, y que también siempre es el mismo en las distintas ejecuciones de la programación, debido a la única programación de “S” y “T” en el primer paso PTP.

El Status y el Turn requieren los dos datos enteros, que deberían indicarse en forma binaria.

La ampliación de una indicación de posición cartesiana para la indicación de Turn permite también poder alcanzar ángulos de eje superiores a +180° o inferiores a -180°, sin una estrategia de desplazamiento especial. Los bits individuales determinan en ejes el signo del valor del eje, de la forma siguiente:

Valor	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0
0	$A6 \geq 0^\circ$	$A5 \geq 0^\circ$	$A4 \geq 0^\circ$	$A3 \geq 0^\circ$	$A2 \geq 0^\circ$	$A1 \geq 0^\circ$
1	$A6 < 0^\circ$	$A5 < 0^\circ$	$A4 < 0^\circ$	$A3 < 0^\circ$	$A2 < 0^\circ$	$A1 < 0^\circ$

Tabla 5.2 - Significado de los bits de Turn (giro)

Con el estado S se tratan las ambigüedades en la posición del eje (véase figura 5.11). Por ello, S depende de la cinemática del robot.

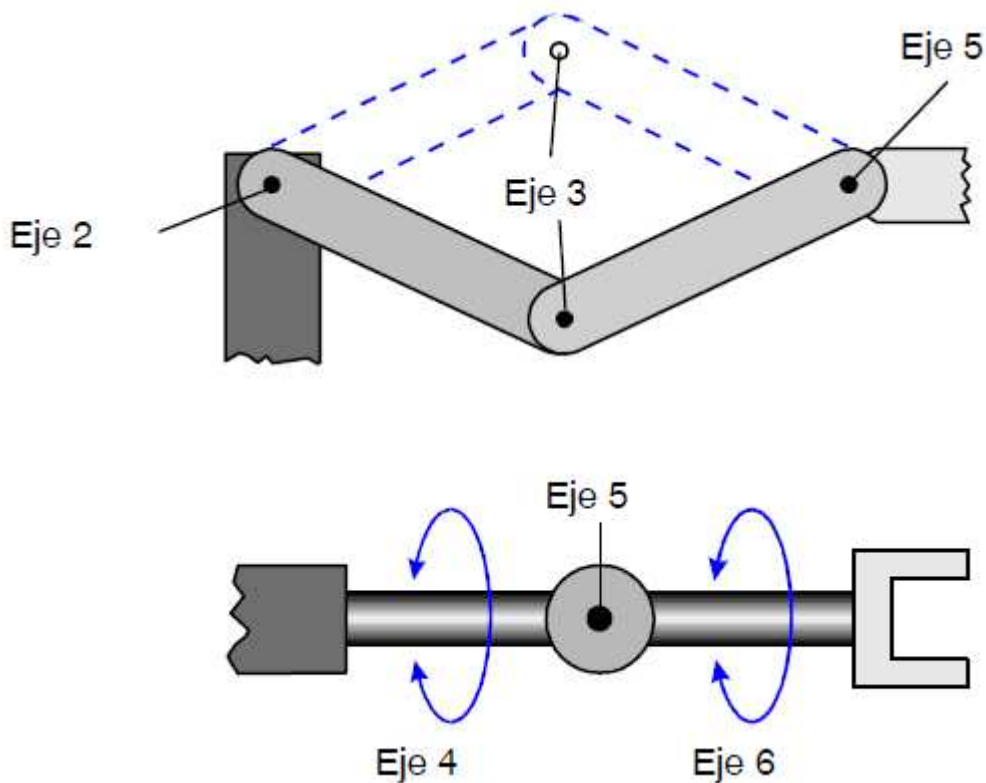


Fig. 5.11 - Ejemplos de cinemáticas de robot ambiguas

El significado de los bits individuales es:

- Bit 0: Posición del punto de la raíz de la mano.
- Bit 1: Configuración del brazo.
- Bit 2: Configuración de la muñeca.

Los bits para los robots de brazo articulado de 6 ejes se definen según la tabla siguiente:

Valor	Bit 2	Bit 1	Bit 0
0	$0^\circ \leq A5 < 180^\circ$ $A5 < -180^\circ$	$A3 < \phi$ (ϕ depende del tipo de robot)	Area básica
1	$-180^\circ \leq A5 < 0^\circ$ $A5 \geq 180^\circ$	$A3 \geq \phi$ (ϕ depende del tipo de robot)	Area por sobre la cabeza

Tabla 5.3 - Bits de Status (estado) para los robots de brazo articulado de 6 ejes

Gráficamente, puede imaginarse el área básica / por sobre la cabeza, de forma cartesiana. Para ello, se definen los conceptos siguientes:

- Punto de la raíz de la muñeca: Punto de intersección de los ejes de la muñeca.
- Sistema de coordenadas A1: Si el eje 1 está a 0° , es idéntico al sistema de coordenadas \$ROBROOT. En los valores que no sean 0° , se mueve conjuntamente con el eje 1.

Con ello, el área básica / por sobre la cabeza, puede definirse del modo siguiente:

- Si el valor x del punto de la raíz de la muñeca, expresado en el sistema de coordenadas A1, es positivo, el robot se encuentra en el área básica.
- Si el valor x del punto de la raíz de la muñeca, expresado en el sistema de coordenadas A1, es negativo, el robot se encuentra en el área por sobre la cabeza.

El bit 1 indica la posición del brazo. La activación del bit depende del tipo de robot respectivo. En los robots con un offset entre el eje 3 y el eje 4 (por ejemplo, KR 30, véase figura 5.12), la posición angular en la que se modifica el valor del bit 1, depende de la magnitud de este offset.

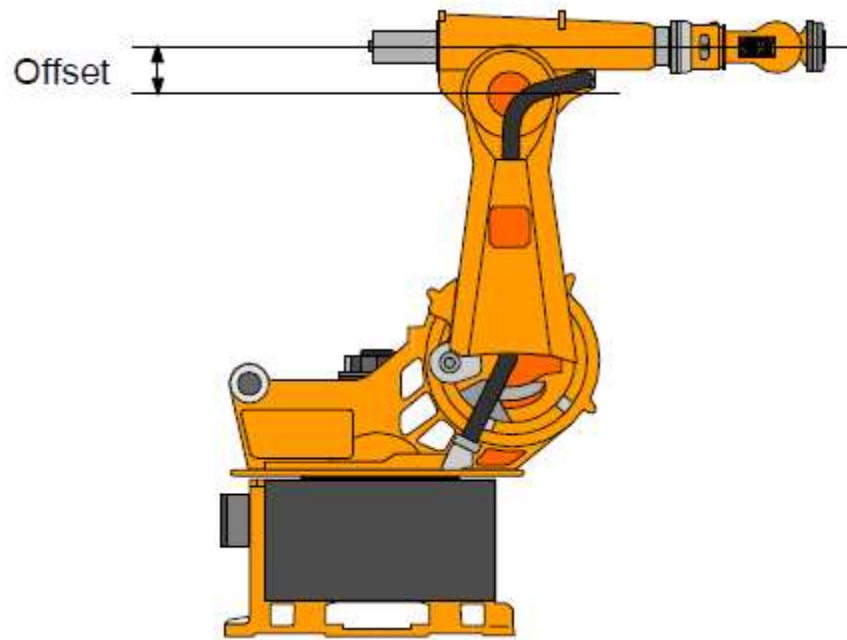


Fig. 5.12 - Offset entre el eje 3 y 4 con un KR 30

En la figura 5.13 se representan los efectos de los bits de Status (estado) en la configuración del robot. El mismo punto en el espacio se alcanzó con cuatro posiciones del robot diferentes. En la primera posición, el robot se encuentra en la posición básica.

Para la segunda configuración el robot, apenas puede apreciarse alguna diferencia.

Desde la posición 2 a 3 se modifica ahora la configuración del brazo.

Finalmente, en la cuarta posición, el robot se encuentra en la posición por sobre la cabeza.

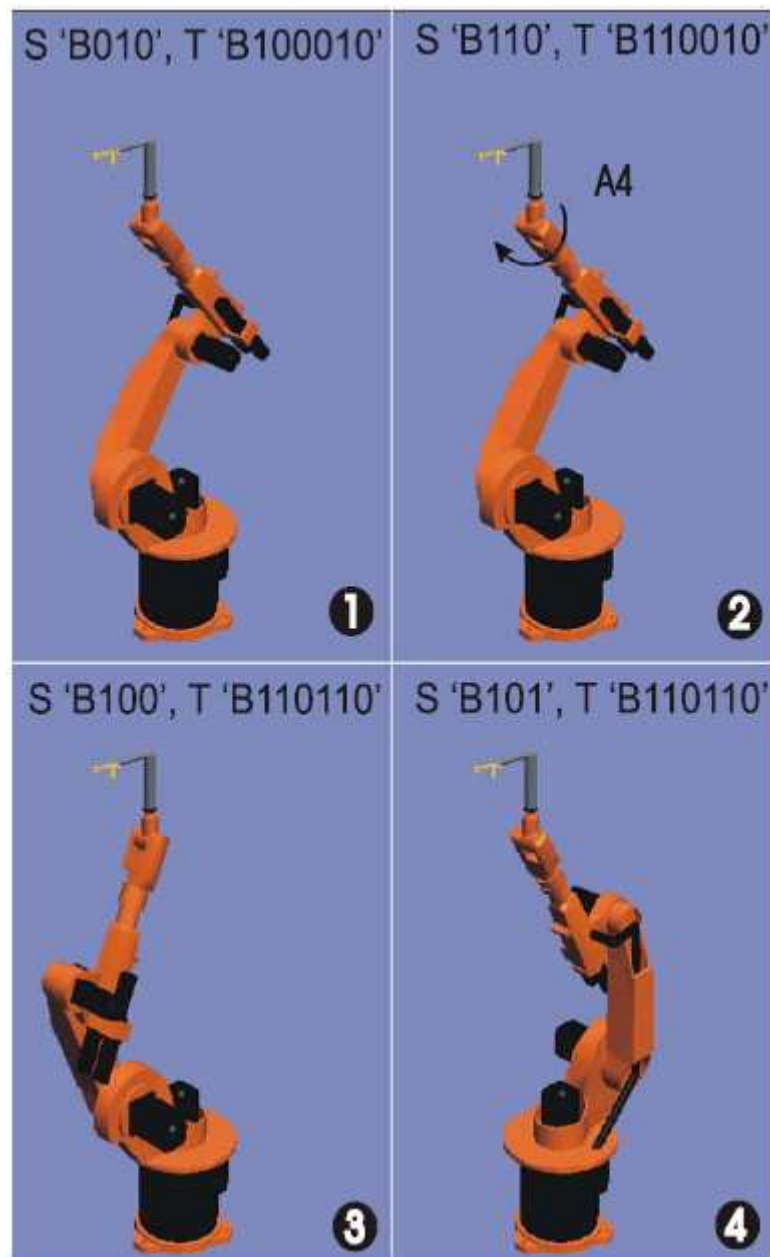


Fig. 5.13 - Efectos de los bits de estado (Status) sobre la posición del robot.

5.3) MOVIMIENTOS SOBRE TRAYECTORIAS

5.3.1) Velocidad y aceleración

Contrariamente a lo que ocurre en los movimientos PTP, los movimientos sobre trayectoria no sólo están prefijados en la posición de partida y de destino. Adicionalmente, se requiere que la punta de la herramienta del robot se mueva en una trayectoria lineal o circular entre estos puntos.

Por ello, las velocidades y aceleraciones indicadas ya no se refieren a los ejes individuales, sino al movimiento del TCP. Las velocidades y aceleraciones deben programarse para la translación, el ángulo de basculamiento y el ángulo de giro.

	Nombre de variable	Tipo de datos	Unidad	Función
Velocidades	\$VEL.CP	REAL	m/s	Velocidad de trayectoria
	\$VEL.ORI1	REAL	°/s	Velocidad de basculamiento
	\$VEL.ORI2	REAL	°/s	Velocidad de giro
Aceleraciones	\$ACC.CP	REAL	m/s ²	Aceleración de trayectoria
	\$ACC.ORI1	REAL	°/s ²	Aceleración de basculamiento
	\$ACC.ORI2	REAL	°/s ²	Aceleración de giro

Tabla 5.4 - Variables del sistema para velocidades y aceleraciones

Como mínimo, uno de los componentes del movimiento (translación, basculamiento y giro), se desplaza en cada instante de la ejecución del movimiento con la aceleración o velocidad programada. Los componentes no dominantes se adaptan con sincronización de fase.

También las velocidades y aceleraciones para los movimientos de trayectoria se ocupan por defecto con los valores máximos definidos en los datos de máquina o en \$CONFIG.DAT.

Además, en movimiento de trayectoria se controlan las velocidades y aceleraciones de los ejes, y en caso de sobrepasar los valores límites de control definidos en las variables del sistema \$ACC_ACT_MA y \$VEL_ACT_MA, se dispara una reacción de parada y se emite un mensaje de fallo. De forma estándar, estos valores límites se encuentran en 250% del valor nominal de aceleración del eje y 110% del valor nominal de la velocidad del eje.

Existe la posibilidad, a través de la variable del sistema \$CP_VEL_TYPE, de reducir el avance de los ejes, y con ello, la aceleración y la velocidad, para evitar el disparo de los valores límites de control. Como declaración por defecto, ha sido ocupada la variable con #CONSTANT, es decir, la reducción no está activa en el servicio con el programa. Si se desea esta función en el modo de servicio T1, se debe activar la variable #VAR_T1 y en todos los modos de servicio #VAR_ALL. En el modo de servicio manual la reducción está siempre activa.

Con la variable del sistema \$CPVELREDMELD se consigue en ambos modos de servicio de test un mensaje, en el caso que la velocidad de trayectoria es reducida. Para ello, la variable para el mensaje debe estar puesta en "1".

5.3.2) Control de orientación

Si durante el movimiento sobre la trayectoria la orientación de la herramienta debe ser modificada en el espacio, puede ajustarse el tipo de control orientación con la ayuda de las variables de sistema \$ORI_TYPE (véase figura 5.14):

- \$ORI_TYPE = #CONSTANT → Durante el movimiento de la trayectoria, la orientación se mantiene constante.

- \$ORI_TYPE = #VAR → Durante el movimiento de la trayectoria, la orientación cambia continuamente desde la orientación inicial a la final.

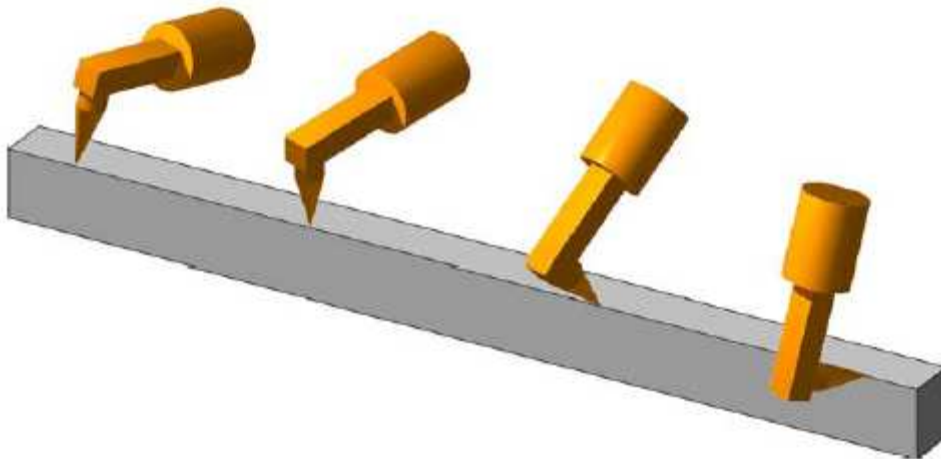


Fig. 5.14 - Modificación de la orientación durante un movimiento lineal

Durante los movimientos circulares puede seleccionarse, adicionalmente a la orientación constante y variable, entre la orientación referida al espacio y a la trayectoria:

- \$CIRC_TYPE = #BASE → Control de orientación referido al espacio durante el movimiento circular.

- \$CIRC_TYPE = #PATH → Control de orientación referido a la trayectoria durante el movimiento circular.

En un control de orientación referido a la trayectoria, el eje longitudinal de la herramienta se mantiene relativo al plano del círculo y a la tangente del mismo. Esta relación puede explicarse con la ayuda del denominado trípode que acompaña a la trayectoria (véase figura 5.15).

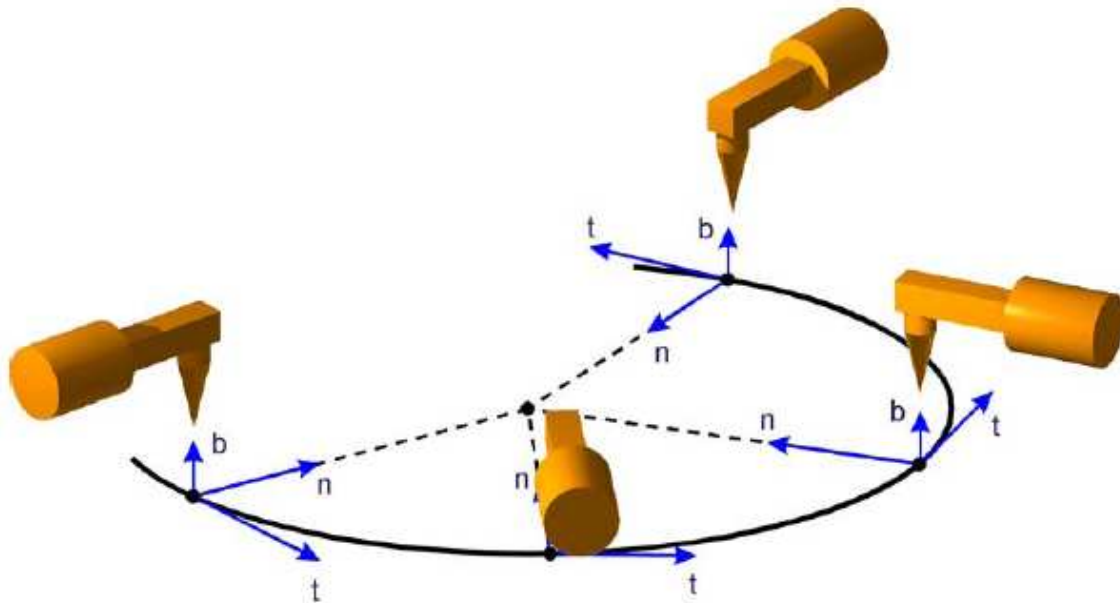


Fig. 5.15 - Control de orientación constante referido a la trayectoria en los movimientos circulares

El trípode que acompaña a la trayectoria se compone del vector tangente a la circunferencia t , del vector de la normal n y del vector de la binormal b .

Para las posiciones de la herramienta no se produce ninguna modificación de la orientación en referencia al trípode que acompaña la trayectoria. Este es, entre otros, un requisito importante para la soldadura al arco.

Si se desea una modificación de la orientación referida a la trayectoria entre la posición de partida y la de destino, se ejecuta la misma en relación al trípode que acompaña la trayectoria, mediante el giro y basculamiento superpuesto (véase figura 5.16). El control de la orientación en el trípode que acompaña la trayectoria es totalmente análoga en los movimientos circulares a la orientación para los movimientos lineales.

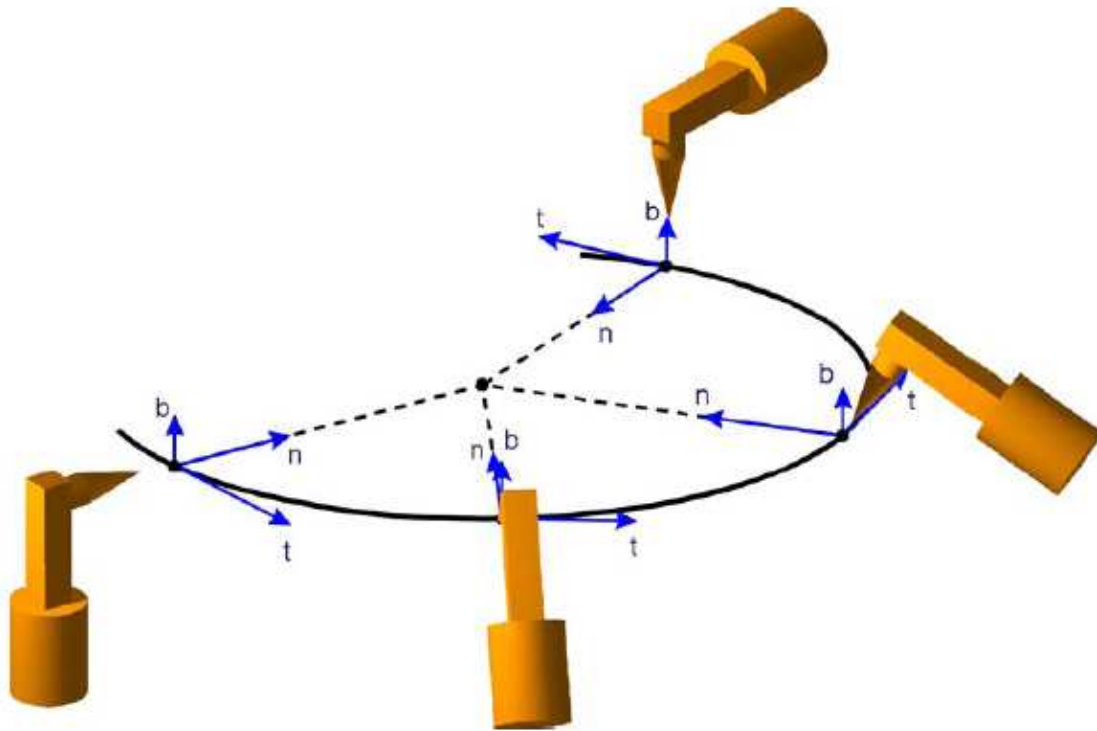


Fig. 5.16 - Control de orientación variable referida a la trayectoria en los movimientos circulares

En el control de la orientación referido al espacio, la orientación se realiza en relación al sistema base actual.

El control de orientación referido al espacio, es especialmente indicado para las aplicaciones en donde el énfasis principal se sitúa en el movimiento sobre la trayectoria, es decir, el control de la punta de la herramienta en la trayectoria circular. Especialmente en las aplicaciones con una pequeña modificación de la orientación entre el punto inicial y de destino, o en las aplicaciones con una orientación exactamente constante en el espacio (véase figura 5.17) durante un movimiento circular (por ejemplo, aplicación de adhesivo, con una boquilla de rotación simétrica).

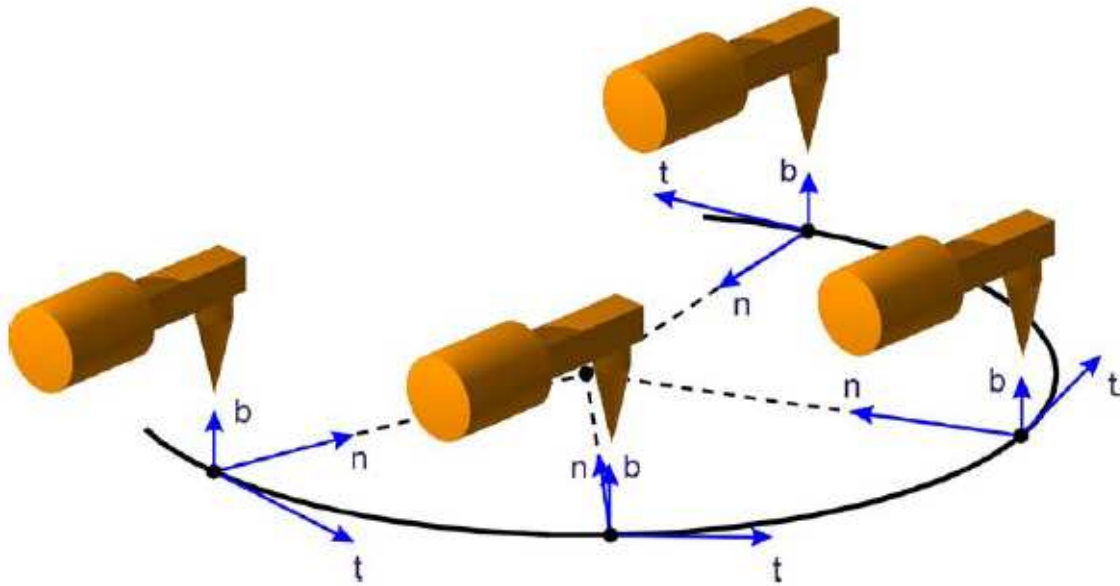


Fig. 5.17 - Control de orientación referida al espacio constante en los movimientos circulares

Se ejecuta nuevamente un cambio de la orientación referida al espacio entre la posición de partida y la de destino, mediante la superposición de los movimientos de basculamiento y de giro (véase figura 5.18). Sin embargo, en este caso, en relación al sistema de coordenadas base.

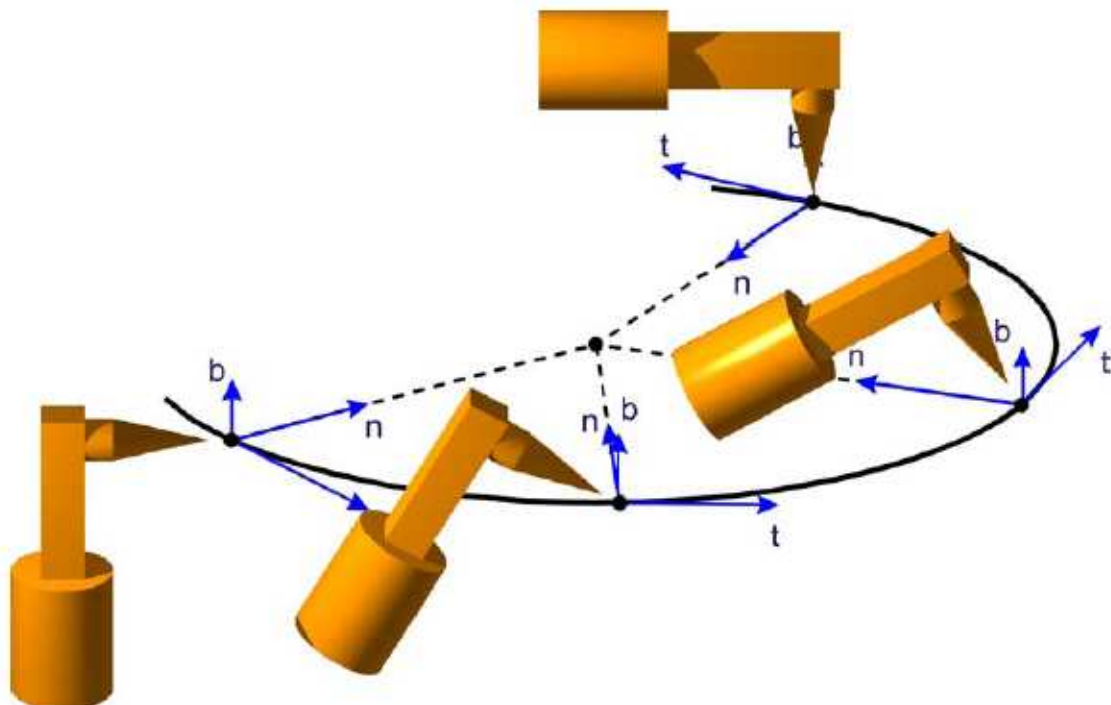


Fig. 5.18 - Control de orientación variable referida al espacio en los movimientos circulares

Se presentan en una lista los preajustes de las variables del sistema para el control de orientación en los movimientos sobre la trayectoria:

	en el sistema	mediante BAS (#INITMOV, 0)
\$ORI_TYPE	#VAR	
\$CIRC_TYPE	#PATH	#BASE

Tabla 5.5 - Preajustes de \$ORI_TYPE y \$CIRC_TYPE

5.3.3) Movimientos lineales

Para un movimiento lineal, la KR C... calcula una recta desde la posición actual hasta la posición que se indicó en la instrucción de movimiento.

La programación de un movimiento lineal se efectúa mediante las palabras claves LIN o LIN_REL en combinación con la indicación de destino. Para los movimientos lineales, la posición de destino se indica de forma cartesiana. Es decir, solamente se admiten los tipos de datos FRAME o POS.

En los movimientos lineales, el estado de los ángulos del punto final debe ser igual al del punto inicial. Por ello, se ignora la indicación del estado (Status) y del giro (Turn) del tipo de datos POS. Por ello, antes de la primera instrucción LIN tiene que estar ya programado un movimiento PTP con la indicación completa de las coordenadas.

5.3.4) Movimientos circulares

Para la definición unívoca de una circunferencia o arco de circunferencia en el espacio, son necesarios tres puntos, diferentes entre sí y que no se encuentran sobre una recta.

El punto inicial de un movimiento circular se indica nuevamente mediante la posición actual, como en los casos PTP o LIN.

Para la programación de un movimiento circular con las instrucciones CIRC o CIRC_REL, por ello, debe definirse también, junto al punto destino, un punto intermedio. Para el cálculo de la trayectoria de movimiento mediante la unidad de control, del punto intermedio solamente se evalúan los componentes traslatorios. La orientación de la punta de herramienta se modifica continuamente según el control de orientación desde el punto inicial hasta el punto final o se mantiene constante.

Adicionalmente a la posición intermedia y de destino, puede programarse un ángulo circular con la opción CA. La posición de destino a alcanzar realmente en el arco de circunferencia se especifica mediante el ángulo de circunferencia programado. Esto es muy útil para la reprogramación de la posición de destino sin modificar la geometría circular.

El arco de circunferencia a recorrer puede prolongarse o acortarse de acuerdo con el ángulo de circunferencia. La orientación de destino programada se alcanza en el punto

de destino real. Mediante el signo del ángulo de circunferencia puede especificarse el sentido de giro, es decir, la dirección en que debe recorrerse el arco de circunferencia (véase figura 5.19):

- $CA > 0^\circ \rightarrow$ En el sentido programado.
- $CA < 0^\circ \rightarrow$ En contra del sentido programado.

El valor del ángulo de circunferencia no está limitado. Especialmente, pueden programarse también circunferencias completas.

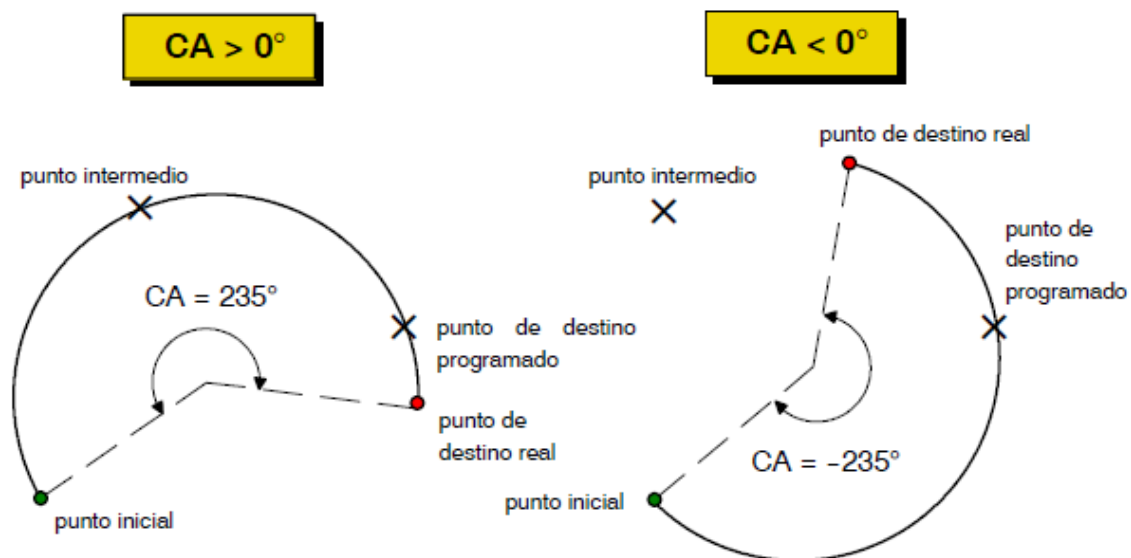


Fig. 5.19 - Influencia de la opción CA en la instrucción CIRC o CIRC_REL

Las indicaciones relativas para la posición intermedia y de destino hacen referencia respectivamente, a la posición inicial. Las indicaciones de posición específicas del eje no son admisibles como en los movimientos LIN. Del mismo modo, \$BASE y \$TOOL deben estar totalmente asignados antes de la ejecución de un movimiento circular.

5.4) PROCESAMIENTO EN AVANCE

Una característica de rendimiento absolutamente fundamental para un robot industrial, es la rapidez con la que puede realizar sus trabajos. Junto a la dinámica del robot, es de importancia decisiva también la eficacia del procesamiento del programa de usuario, que junto a los movimientos consta también de instrucciones aritméticas y de control de los periféricos.

Un procesamiento más rápido del programa puede conseguirse:

- Mediante la reducción de la duración del movimiento.
- Mediante la reducción del tiempo de parada entre los movimientos.

Con las condiciones marginales prefijadas, como las velocidades y aceleraciones máximas del eje, esto se alcanza mediante el posicionamiento aproximado de los movimientos en un tiempo óptimo.

El tiempo de parada entre los movimientos puede reducirse cuando las instrucciones aritméticas y lógicas intensivas se elaboran entre los pasos de movimiento, durante el movimiento del robot.

A través de la variable del sistema \$ADVANCE, pueden especificarse cuantos pasos de movimiento en avance deben adelantarse, como máximo, respecto a la ejecución principal. El puntero principal visible en la superficie de operación durante el procesamiento del programa, muestra siempre el paso de movimiento en ejecución.

Por el contrario, el puntero de avance no es visible y puede mostrar tanto instrucciones completamente ejecutadas por la unidad de control, como también pasos de movimiento solamente preparados por la misma, y que se ejecutan posteriormente en la ejecución principal (véase figura 5.20).

```

13
14 $ADVANCE=1
15
16 → LIN {X 1620,Y 0,Z 1910,A 0,B 90,C 0} ← Puntero principal
17
18 STROM={STROM*1.2}/0.5
19 FOR I=1 TO 6
20     $VEL_AXIS[I]=60
21     $ACC_AXIS[I]=35
22 ENDFOR
23
24 PTP PUNKT6 ← El puntero de avance se encuentra en
25             esta posición; $ADVANCE = 1
26 SPANNUNG=110
27
28 PTP PUNKT7
29
30
31

```

Fig. 5.20 - Punteros principal y de avance

Para permitir un posicionamiento aproximado, debe estar declarado, como mínimo, un avance de 1. (La variable \$ADVANCE posee siempre, de forma estándar, el valor "3". Se tienen, como máximo, 5 pasos en el procesamiento en avance).

En un subprograma de interrupción no es posible el procesamiento en avance. La unidad de control confecciona siempre los programas de interrupción por líneas, por lo que no es posible un posicionamiento aproximado en ellos.

Preajustes de \$ADVANCE

	en el sistema	mediante BAS (#INITMOV, 0)
\$ADVANCE	0	3

Instrucciones y datos que pudieran influenciar la periferia, o que se refieren al estado actual del robot, generan una parada del procesamiento en avance (véase tabla 5.6). Esto es necesario para asegurar la secuencia correcta en ejecución y tiempo, de las instrucciones y los movimientos del robot.

Instrucciones	ANOUT ON	ANOUT OFF		
	ANIN ON	ANIN OFF		
	DIGIN ON	DIGIN OFF		
	PULSE			
	HALT	WAIT		
	CREAD	CWRITE	COPEN	CCLOSE
	SREAD	SWRITE		
	Combinaciones CP-PTP sin posicionamiento aproximado			
Instrucciones en combinación con una interrupción	END (en caso que en el módulo no ha sido definida una interrupción global)			
	INTERRUPT DECL (en caso que la interrupción haya sido declarada)			
	RESUME sin BRAKE			
Variables del sistema más utilizadas	\$ANOUT[Nr]	\$ANIN[Nr]		
	\$DIGIN1	\$DIGIN2	...	\$DIGIN6
	\$OUT[Nr]	\$IN[Nr]		
	\$AXIS_ACT	\$AXIS_BACK	\$AXIS_FOR	\$AXIS_RET
	\$POS_ACT	\$POS_BACK	\$POS_FOR	\$POS_RET
	\$AXIS_INC	\$AXIS_INT	\$POS_ACT_MES	\$POS_INT
	\$TORQUE_AXIS	\$ASYNC_AXIS		
	\$TECH[X].MODE, \$TECH[X].CLASS en determinadas operaciones			
\$LOAD, \$LOAD_A1, \$LOAD_A2, \$LOAD_A3 (en caso de tratarse de un robot de exactitud absoluta con cambio de carga)				

otras variables del sistema	\$ALARM_STOP \$SEM_STOP \$ACT_TOOL \$OV_PRO \$ASYNC_EX_A X_DECOUPLE	\$AXIS_ACTMOD \$EXTSTARTTYP \$PAL_MODE \$WORKSPACE	\$INHOME_POS \$REVO_NUM \$ACT_BASE \$IBUS_OFF	\$ON_PATH \$SAFETY_SW \$ACT_EX_AX \$IBUS_ON
Variables importadas	todas, con el acceso			
Otros	Si entre pasos de posicionamiento aproximado se efectúa un cambio de filtro, se genera una parada del procesamiento en avance.			

Tabla 5.6 - Instrucciones y variables que activan una parada automática del procesamiento en avance

En los casos de aplicación en los que tiene que impedirse esta parada del procesamiento en avance, inmediatamente antes de la instrucción correspondiente, debe programarse la instrucción CONTINUE. La unidad de control continúa entonces con el avance. Sin embargo, el efecto está limitado a la línea de programa siguiente.

Si por el contrario, Ud. desea detener el procesamiento en avance en un lugar determinado sin tener que modificar para ello la variable de sistema \$ADVANCE, simplemente programe en este lugar un tiempo de espera de cero segundos. La instrucción WAIT activa una parada automática del procesamiento en avance, sin otro efecto en particular.

WAIT SEC 0

5.5) MOVIMIENTOS CON POSICIONAMIENTO APROXIMADO

Para aumentar la velocidad puede utilizarse el posicionamiento aproximado en aquellos casos en donde no es necesario posicionar exactamente sobre el punto. El robot acorta el recorrido, tal como se muestra en la figura 5.21.

El contorno de posicionamiento, aproximado lo genera automáticamente la unidad de control. Para el cálculo del paso de posicionamiento aproximado, el control necesita los datos del punto inicial, del punto de posicionamiento aproximado y del punto final.

Para permitir un posicionamiento aproximado, el procesamiento en avance debe estar definido, como mínimo, en 1. En el caso de que el procesamiento en avance sea demasiado pequeño, aparece el mensaje “Aproximación no posible” y el desplazamiento hasta los puntos se realiza en forma exacta.

Si programa una instrucción después de una instrucción de posicionamiento aproximado que activa una parada automática del procesamiento en avance, no es posible efectuar un posicionamiento aproximado.

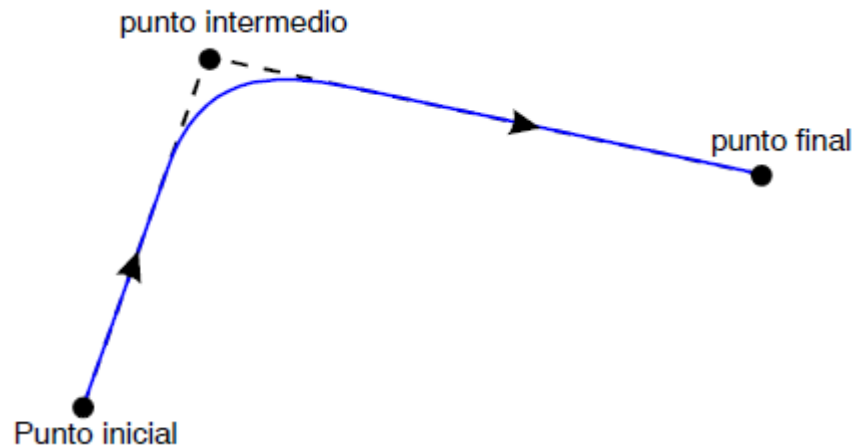


Fig. 5.21 - Posicionamiento aproximado de los puntos auxiliares

5.5.1) Aproximación PTP – PTP

Para el posicionamiento aproximado PTP, la unidad de control calcula las distancias a recorrer axialmente en la zona de aproximación y planifica para cada eje los perfiles de velocidad para cada eje, que aseguran las transiciones tangenciales de los pasos individuales para asegurar al contorno de posicionamiento aproximado.

El posicionamiento aproximado se inicia cuando el último eje sobrepasa por defecto un ángulo determinado hacia el punto de posicionamiento aproximado. En los datos de la máquina se ha predefinido un ángulo para cada eje:

$$\$APO_DIS_PTP [1] = 90$$

↓

$$\$APO_DIS_PTP [6] = 90$$

Mediante \$APO.CPTP puede indicarse en el programa el comienzo del posicionamiento aproximado en forma de porcentaje de estos valores máximos.

Cuanto mayor es \$APO.CPTP, más se redondea la trayectoria.

El posicionamiento aproximado no puede producirse por detrás del centro del paso. En este caso, el sistema se limita automáticamente al centro del paso.

El posicionamiento aproximado de un punto se indica en la instrucción PTP adjuntando la palabra clave C_PTP, por ejemplo:

PTP PUNTO 4 C_PTP

También el paso de posicionamiento aproximado PTP se ejecuta en el tiempo óptimo, es decir, mientras se efectúa el posicionamiento aproximado, se desplaza siempre como mínimo, un eje con el valor límite programado para la aceleración o velocidad. Simultáneamente, se asegura para cada eje que no se superan los momentos admitidos

para los engranajes reductores y motores. El perfil de marcha más elevado ajustado de forma estándar, garantiza un control de los movimientos invariante en velocidad y en aceleración.

Dado que la trayectoria de un movimiento PTP en general, no es una recta ni está en un plano en el espacio, no puede representarse estrictamente como se muestra en la figura 5.22.

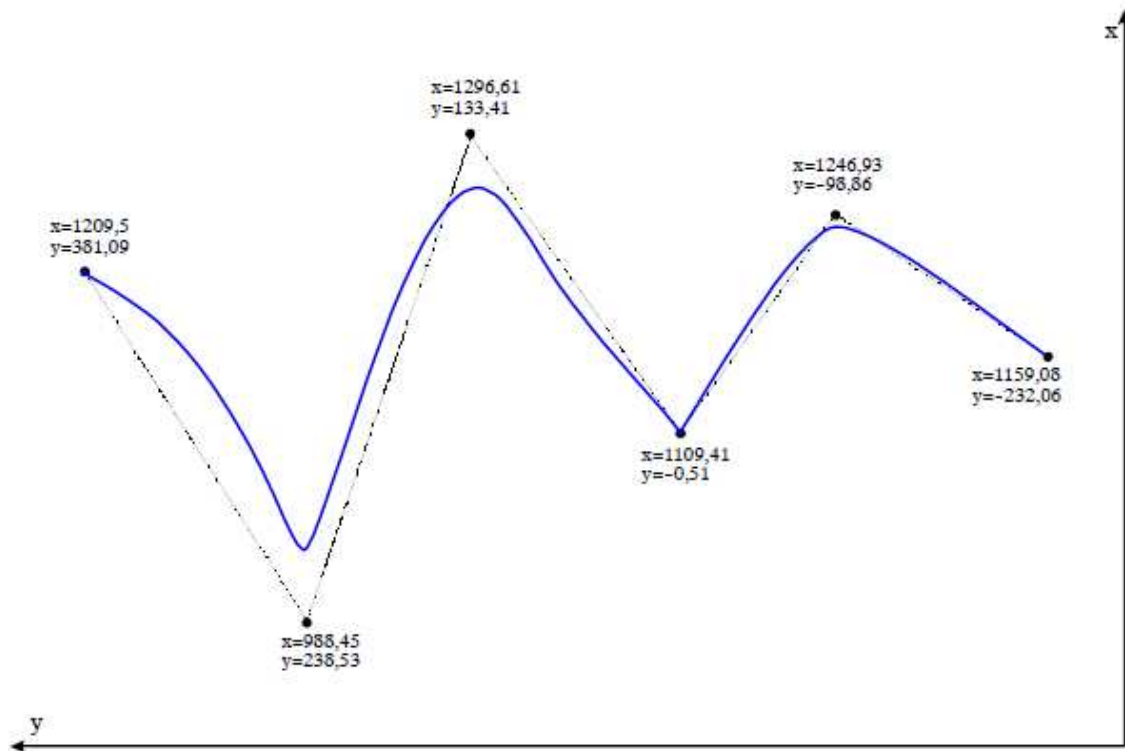


Fig. 5.22 - Ejemplo para el posicionamiento aproximado PTP – PTP

5.5.2) Aproximación LIN – LIN

Para el movimiento continuo a lo largo de trayectorias complejas, existe el requisito de efectuar el posicionamiento aproximado también entre pasos individuales lineales. Los diferentes movimientos de orientación en los pasos LIN, deben pasar gradualmente unos dentro de otros.

Como contorno de posicionamiento aproximado, la unidad de control calcula una trayectoria parabólica, dado que esta forma de contorno se aproxima muy bien al recorrido de la trayectoria de los pasos individuales con el mejor aprovechamiento de las reservas de aceleración en la zona de aproximación.

Para la especificación del comienzo del posicionamiento aproximado, se dispone de tres variables predefinidas (véase tabla 5.7).

Variable	Tipo datos	Unidad	Significado	Palabra clave en la instrucción
\$APO.CDIS	REAL	mm	Criterio de distancia de translación	C_DIS
\$APO.CORI	REAL	°	Criterio de orientación	C_ORI
\$APO.CVEL	INT	%	Criterio de velocidad	C_VEL

Tabla 5.7 - Variables del sistema para la especificación del comienzo del posicionamiento aproximado

Puede asignarse un valor porcentual a la variable \$APO.CDIS. Si el posicionamiento aproximado se activa por medio de esta variable, la unidad de control abandona el contorno individual dual a partir del momento cuando sobrepasa por defecto la distancia hasta el punto final con valor \$APO.CDIS.

Puede asignarse un valor porcentual a la variable \$APO.CORI. El contorno individual se abandona, en este caso, a partir del momento cuando el ángulo de orientación dominante pasa por debajo de la distancia al punto de posicionamiento aproximado programado, especificada en \$APO.CORI.

Puede asignarse un valor porcentual a la variable \$APO.CVEL. Este valor indica el porcentaje de la velocidad programada a partir de qué se comienza con la operación de posicionamiento aproximado, en la fase de frenado del paso individual. Para ello, se evalúa cada componente de translación, basculamiento y giro que se alcanza mediante el movimiento del valor de velocidad programado, o el que más se le aproxime.

Cuanto mayor son los valores en \$APO.CDIS, \$APO.CORI o \$APO.CVEL, antes se comienza con el posicionamiento aproximado.

El posicionamiento aproximado se activa mediante la adición de una de las palabras clave C_DIS, C_ORI o C_VEL en la instrucción LIN o LIN_REL.

La posición en la que desemboca el contorno de posicionamiento aproximado en el paso de movimiento LIN posterior, es calculada automáticamente por la unidad de control.

En pasos individuales cortos se limita el comienzo de la zona de aproximación a la mitad de la longitud del paso. La velocidad se reduce para ello de forma tal, que pueda mantenerse siempre un posicionamiento exacto en el punto siguiente.

Las transiciones entre los pasos individuales y el contorno de posicionamiento aproximado son permanentes y son tangenciales. Esto garantiza una transición “suave” que protege la mecánica, ya que los componentes de velocidad son siempre constantes.

El contorno generado por la unidad de control en la zona de aproximación depende de las modificaciones del override, que se admiten para cada instante del movimiento.

5.5.3) Aproximación CIRC – CIRC y aproximación CIRC – LIN

El posicionamiento aproximado entre los pasos CIRC y otros pasos CP, es casi idéntico al posicionamiento aproximado entre dos pasos LIN. Tanto el movimiento de orientación como el translatorio deben pasar sin saltos de velocidad de uno a otro contorno de paso individual. El comienzo del posicionamiento aproximado se define nuevamente a través de las variables \$APO.CDIS, \$APO.CORI o \$APO.CVEL, cuya evaluación se ejecuta de forma totalmente idéntica a los pasos LIN. El ajuste del criterio de posicionamiento aproximado deseado se efectúa siempre con la ayuda de las palabras clave C_DIS, C_ORI o C_VEL.

El posicionamiento aproximado CIRC – CIRC se puede ver en la siguiente figura:

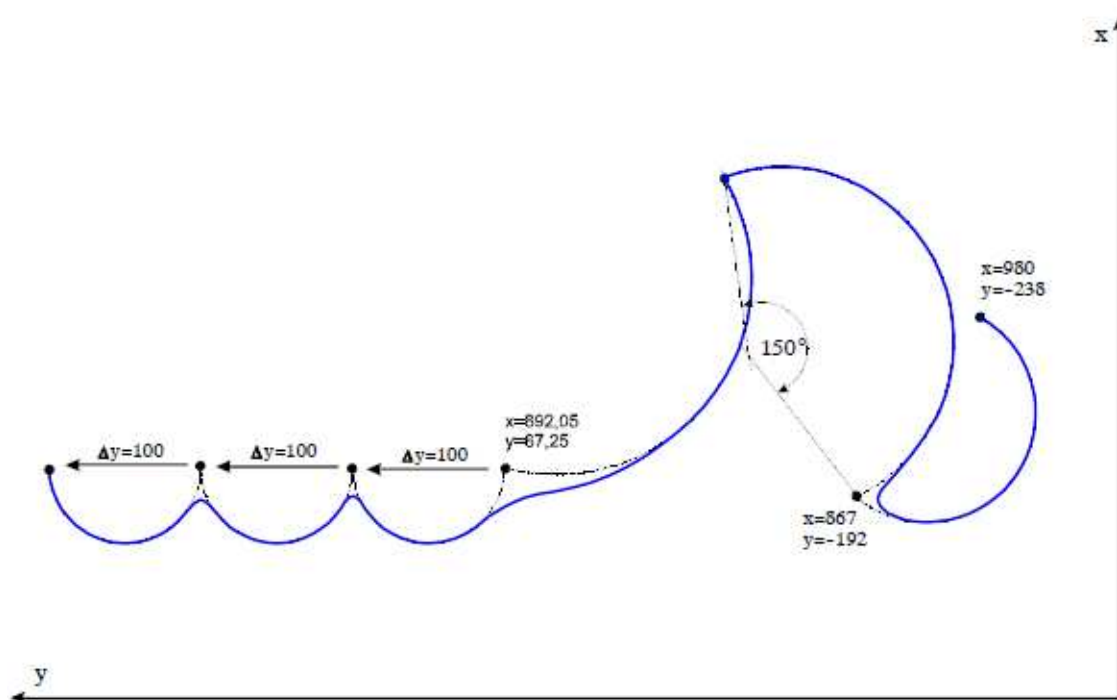


Fig. 5.24 - Ejemplo para el posicionamiento aproximado CIRC – CIRC

Debido al requisito de transiciones tangenciales, durante el posicionamiento aproximado con pasos CIRC, no puede calcularse, en general, ningún contorno de posicionamiento aproximado simétrico. Por ello, la trayectoria de posicionamiento aproximado consta de dos segmentos parabólicos que pasan tangencialmente uno dentro de otro y que desembocan simultáneamente, de forma tangencial, en los pasos individuales (véase figura 5.25).

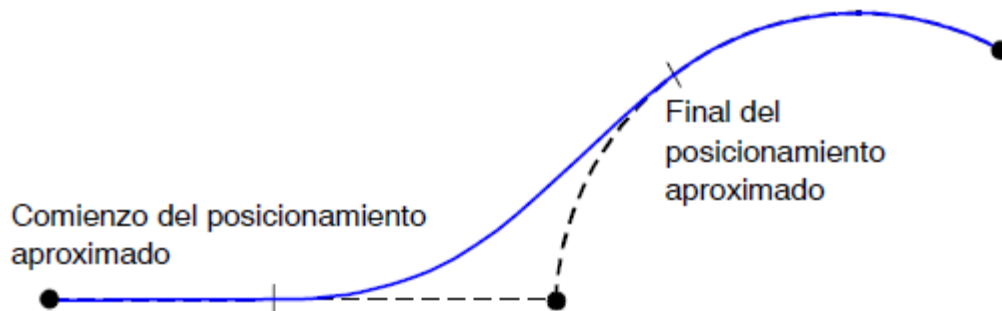


Fig. 5.25 - Contorno de posicionamiento aproximado en los pasos LIN – CIRC

Durante el posicionamiento aproximado CIRC, se interpola, básicamente, con referencia al espacio. La orientación de partida es siempre la orientación que se alcanzó en el punto de posicionamiento aproximado. Si se ejecutan dos pasos de posicionamiento aproximado con orientación referida a la trayectoria, a pesar de ello, la reorientación en la zona de aproximación se comporta con referencia al espacio.

5.5.4) Aproximación PTP – trayectoria

Existe la posibilidad, de efectuar posicionamientos aproximados entre pasos de movimiento PTP específicos del eje y de trayectoria cartesiana. El movimiento PTP ofrece las siguientes posibilidades:

- Básicamente en más rápido que en el mismo caso cartesiano, especialmente en la proximidad de posiciones singulares.
- En contraposición a la interpolación cartesiana, permite un cambio de configuración.

La trayectoria exacta de un movimiento PTP no puede ser determinada con antelación, dado que el robot efectúa para él, el recorrido más rápido. Aquí la trayectoria es influenciada un poco con algunos factores.

Sin embargo, las ventajas de la interpolación específica del eje sólo pueden aprovecharse totalmente cuando se tiene la posibilidad de una transición continua entre pasos específicos del eje y cartesianos, ya que durante una parada exacta, se pierden en gran parte el tiempo ganado.

La programación de la aproximación PTP – trayectoria, se efectúa de forma totalmente análoga al procedimiento presentado hasta ahora. La zona de aproximación se especifica del modo siguiente:

- *Aproximación PTP → trayectoria*: El comienzo de la aproximación se determina mediante el criterio PTP \$APO.CPTP. Para el paso de movimiento de trayectoria siguiente, puede indicarse explícitamente un criterio de aproximación, que especifica la entrada en el paso CP.

Esto se produce mediante la secuencia de instrucciones:

PTP PUNTO 1 C_PTP C_DIS

LIN PUNTO 2

Si en el paso PTP falta una indicación para el criterio de aproximación deseado en el paso CP, C_DIS se utiliza como valor por defecto para la determinación de la entrada en el paso CP.

El contorno de aproximación de una aproximación PTP – trayectoria, o bien, trayectoria – PTP, es un movimiento PTP. Por ello no es posible una determinación exacta de la trayectoria de aproximación.

- *Aproximación trayectoria* → *PTP*: Para el paso CP se utiliza el criterio de aproximación programado, para el paso PTP se recurre a \$APO.CPTP.

Por lo tanto, una secuencia de instrucción podría tener el aspecto siguiente:

CIRC AUX PUNTO 1 C_VEL

PTP PUNTO 2

Sin embargo, la aproximación CP – PTP solamente puede garantizarse cuando ninguno de los ejes del robot en el paso de trayectoria gira más de 180° y el estado S no cambia, ya que estas modificaciones de posición no son previsibles durante la planificación del contorno de aproximación. Si se produce un cambio de configuración de este tipo en el paso de trayectoria antes de la aproximación (modificación de S o T), el paso de trayectoria se recorre hasta el final como un paso individual para el punto final programado, y se emite el mensaje de fallo confirmable “Progr. aproximación CP/PTP no ejecutable”. El usuario debe descomponer entonces el paso CP en varios pasos individuales, de forma que el paso individual antes de la aproximación CP – PTP sea suficientemente corto para poder excluir un cambio de S o de T en todos los ejes del robot.

5.5.5) Posicionamiento aproximado mejorado

En el posicionamiento aproximado entre movimientos CP y PTP la KSS ofrece un comportamiento mejorado, que normalmente se encuentra activado. En muchos casos se posibilita así una ganancia en el tiempo de ciclo, dado que el recorrido del eje en la zona de posicionamiento aproximado se efectúa en un tiempo menor.

Los casos excepcionales en los que la KSS reduce la distancia de posicionamiento aproximado y la velocidad en la zona de posicionamiento aproximado disminuye, aparecen cada vez con menor frecuencia con la aplicación del posicionamiento aproximado mejorado.

El mejoramiento del posicionamiento aproximado mixto es activado en el archivo “\$OPTION.DAT” con (“TRUE”) o desactivado (“FALSE”).

En una instalación nueva, el posicionamiento aproximado mejorado es activado automáticamente. En el caso de una actualización (update), esta función sólo es aceptada, si anteriormente ha estado activada (“TRUE”). De otro modo, es puesta en “FALSE”.

5.5.6) Cambio de herramienta con posicionamiento aproximado

Esta funcionalidad se encuentra disponible para todas las combinaciones de pasos individuales de PTP, LIN y CIRC.

Es posible cambiar una herramienta en forma virtual también durante el posicionamiento aproximado. Es decir, una herramienta es aprendida dos veces de forma diferente. Por ejemplo en una pistola de aplicación, la distancia a la pieza es en “TOOL1” 5 cm y en “TOOL2” 10 cm.

5.6) PROGRAMACIÓN POR APRENDIZAJE DE LOS PUNTOS

La integración del procedimiento de aprendizaje es una característica de calidad fundamental de un lenguaje de programación de robot.

Para ello, en KRL solamente tiene que programar un símbolo ! como posicionador para las coordenadas a enseñar posteriormente:

PTP !

LIN ! C_DIS

CIRC ! , CA 135.0

En la unidad de control pueden aceptarse entonces las coordenadas correspondientes, y después de pulsar la tecla softkey “Modificar”, y entonces “Touch Up” memorizarlas en el programa en el lugar correspondiente. Las coordenadas actuales se escriben directamente en la estructura seleccionada, en código SRC.

Al programar por aprendizaje las coordenadas cartesianas, el sistema de coordenadas base válido actualmente en el sistema, es tomado como sistema de referencia. Por ello, debe asegurarse de que durante la programación por aprendizaje esté siempre declarado el sistema de coordenadas base necesario para el movimiento posterior.

La KR C... permite otra variante de la programación por aprendizaje: programe una instrucción de movimiento con una variable que NO declare en la sección de declaraciones, por ejemplo:

PTP PUNTO_ARR

Después de activar los softkeys “Modificar” y “Var” se le requerirá que seleccione la estructura deseada. Realizado esto, en la lista de datos correspondiente se declara automáticamente una variable PUNTO_ARR y se ocupa con las coordenadas reales actuales respecto a \$BASE actual.

Si no ha declarado la lista de datos, aparece el correspondiente mensaje de fallo.

Si ha creado una instrucción de movimiento a través de los formularios inline puede utilizar también, posteriormente, los puntos programados por aprendizaje a través del formulario, en una instrucción de movimiento KRL.

Los puntos se almacenan en la lista de datos correspondiente con los nombres indicados en el formulario y una X delante.

También aquí debe tenerse en cuenta que en ambos casos tiene que utilizarse el mismo sistema de coordenadas base para que se produzca el desplazamiento hasta el mismo punto.

5.7) PARÁMETROS DE MOVIMIENTO

Esta función permite la modificación del entorno tubular de control para el control contra colisiones. Con ello puede determinarse la sensibilidad del control de colisiones.

Los valores declarados en los datos de máquina se utilizan como valores por defecto. De forma alternativa, el usuario puede definir para los distintos movimientos también distintos grados de sensibilidad.

Alternativamente, el usuario puede determinar individualmente cuanto se ha de permitir la desviación entre los valores reales y nominales de los momentos. Al sobrepasar estos valores, el robot se detiene.

Este tipo de control no representa ninguna garantía contra daños de útiles en una colisión, pero reduce los mismos.

6) DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE

6.1) INSTRUMENTOS EMPLEADOS PARA EL MONTAJE

Los instrumentos que usamos para poder llevar a cabo los ensayos, fueron:

- *Laser Tracker*: Es un sistema de seguimiento laser que mide coordenadas 3D mediante el seguimiento de un rayo laser en un objetivo retrorreflectante en contacto con el objeto en cuestión. Algunos sistemas de seguimiento laser pueden medir objetos a distancias tan próximas o lejanas como 60 metros. Otros presentan una precisión típica de punto sencillo de unos 0,001" (25 micrómetros) a distancias de varios metros. Los sistemas de seguimiento recopilan datos de coordenadas con alta velocidad y tan sólo precisan un operario. Ofrecen métodos mejorados de medición por coordenadas y posibilitan métodos de fabricación totalmente nuevos.

El funcionamiento del sistema de seguimiento laser es fácil de comprender: mide dos ángulos y una distancia. El sistema de seguimiento envía un rayo laser a un objetivo retrorreflector que se mantiene frente al objeto que debe medirse. La luz que refleja el objetivo regresa por el mismo camino y vuelve a entrar en el sistema de seguimiento en la misma posición por donde salió.

Aunque los objetivos retrorreflectores varían, los más populares son los retrorreflectores de montaje esférico (SMR, por sus siglas en inglés). Cuando la luz vuelve a entrar en el sistema de seguimiento, parte de ella pasa al medidor de distancia que mide la distancia desde el sistema de seguimiento al SMR (véase figura 6.1).

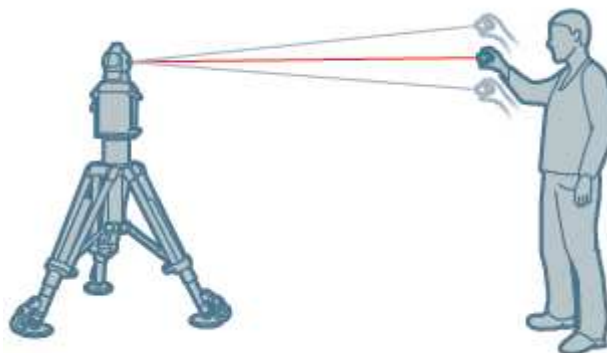


Fig. 6.1 - Laser tracker y retrorreflector

El medidor de distancia puede ser de dos tipos: interferómetro o medidor de distancia absoluta (ADM, por sus siglas en inglés).

Un sistema de seguimiento laser contiene dos encoders angulares. Estos dispositivos miden la orientación angular de los dos ejes mecánicos del sistema de seguimiento: el eje de acimut (horizontal) y el cénit (vertical). Los ángulos de los encoders y la distancia

desde el medidor de distancia son suficientes para localizar con precisión el centro del SMR. Dado que el centro del SMR siempre está a una distancia compensada fija con respecto a cualquier superficie que se mide, es posible obtener fácilmente las coordenadas de las superficies o los puntos medidos con el SMR.

En una secuencia de medición típica, el operario coloca el SMR en la posición inicial del sistema de seguimiento y restablece el interferómetro a la distancia (inicial) conocida. Cuando el operario mueve el SMR a la ubicación deseada, el laser efectúa un seguimiento longitudinal, y permanece fijo en el centro del SMR. Este procedimiento funciona bien siempre que el rayo del sistema de seguimiento que va al SMR no se vea interrumpido por un obstáculo en el camino del rayo. En caso de interrumpirse el rayo, sin embargo, el conteo ya no será válido y la distancia no se podrá calcular. Cuando esto sucede, el sistema de seguimiento indica que se ha producido un error. El operario debe colocar de nuevo el SMR en un punto de referencia, como la posición inicial del sistema de seguimiento.

Otra función del sistema de seguimiento es la dirección y el control del rayo. Un tipo de sistema de seguimiento emite el rayo laser directamente de la estructura rotativa. Otro tipo de sistema de seguimiento refleja un rayo laser desde un espejo rotativo. En cualquier caso, el sistema de seguimiento del laser tracker apunta el rayo laser en la dirección deseada rotando los ejes mecánicos. En muchas aplicaciones, el sistema de seguimiento mantiene el rayo centrado sobre un SMR que se mueve rápidamente. Para ello, divide parte del rayo laser de regreso en un detector de sondeo de posición (PSD, por sus siglas en inglés). Si el rayo laser toca el SMR fuera del centro, el rayo dividido también toca el PSD fuera del centro, lo que genera una señal de error. Esta señal controla la rotación de los ejes mecánicos del laser tracker para mantener el rayo centrado en el SMR.



Fig. 6.2 - Laser Tracker

- *Robot*: En nuestro caso es un brazo mecánico articulado de 6 ejes (véase figura 6.3).



Fig. 6.3 - Robot

- *Bancada*: Soporte de acero para sujetar el laser tracker y el robot (véase figura 6.4).

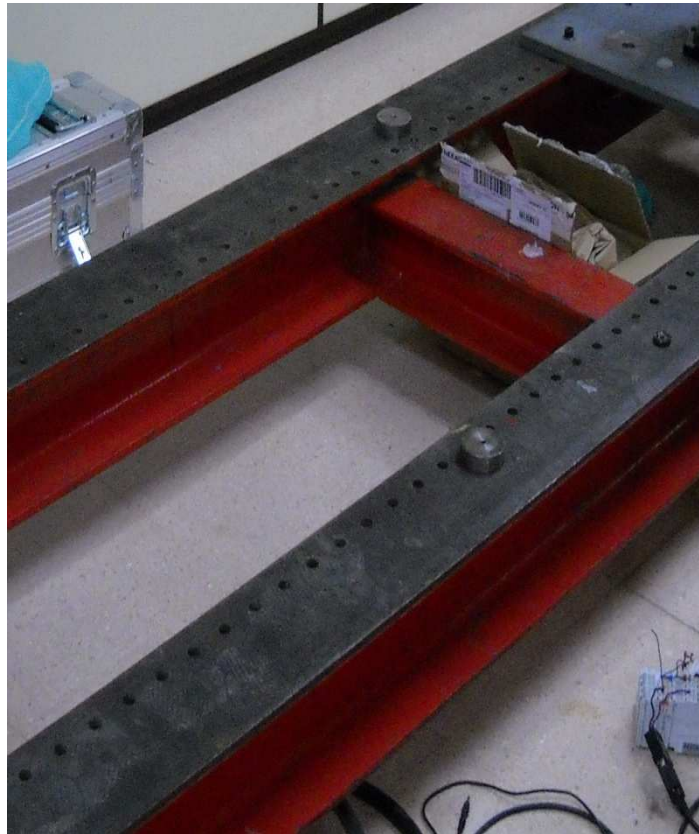


Fig. 6.4 - Bancada de acero

- *Dos ordenadores*: Uno para la captura de datos del laser tracker y otro para la captura de datos del robot y la introducción de los programas de movimiento del robot.

6.2) PREPARACIÓN DEL MONTAJE

Para la realización de los ensayos tuvimos que preparar el siguiente montaje (véase figura 6.5).



Fig. 6.5 - Montaje laser tracker y robot

Como se puede apreciar en la imagen anterior, el laser tracker está situado enfrente del robot, y tanto el laser tracker, como el robot, se encuentran anclados a una bancada de acero para que se muevan los dos solidarios en caso de que haya algún tipo de movimiento. Esto se hace para que el laser tracker pueda capturar los movimientos que realiza el robot, y así, poder medir los erros cometidos por el robot en los diferentes tipos de ensayos.

También tuvimos que conectar cada dispositivo a un ordenador diferente para la captura de datos.

Para realizar estos ensayos con la mayor exactitud posible le colocamos en el TCP del robot, un reflector, donde se va a reflejar el rayo del laser tracker, y un cilindro de acero para simular el peso de la herramienta (véase figura 6.6).

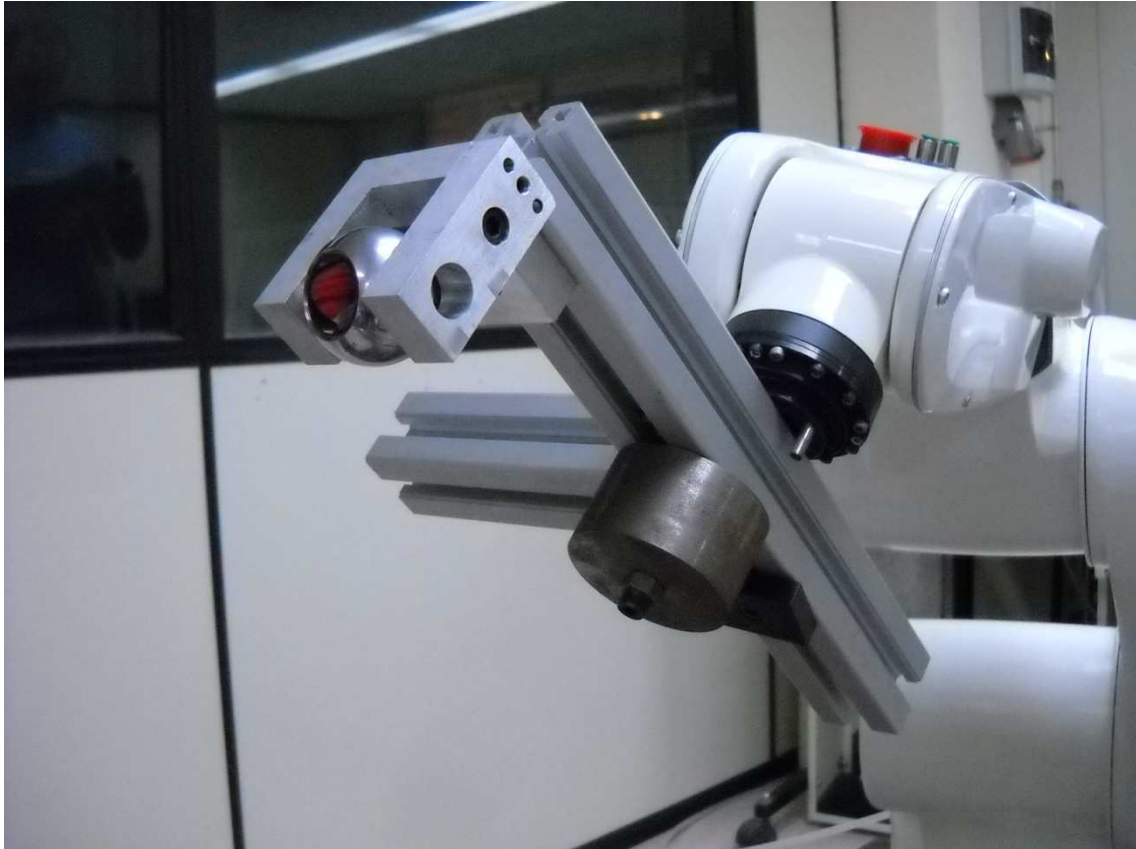


Fig. 6.6 - Detalle, reflector y cilindro de acero

En la imagen mostrada se puede observar el cilindro de acero que actúa de simulador del peso de la herramienta que estaría manejando el robot en ese momento. El peso de la estructura de aluminio en forma de T y del cilindro es de 2.5 kg.

También podemos observar, en el extremo, el reflector, donde incide el rayo del laser tracker y es devuelto por dicho reflector al mismo. Si observamos bien la imagen podemos darnos cuenta de que el rayo del laser tracker en el momento en que tomamos la fotografía, estaba incidiendo sobre el reflector porque los cristales del mismo se ven rojos.

En la siguiente imagen se puede ver con más detalle el reflector.

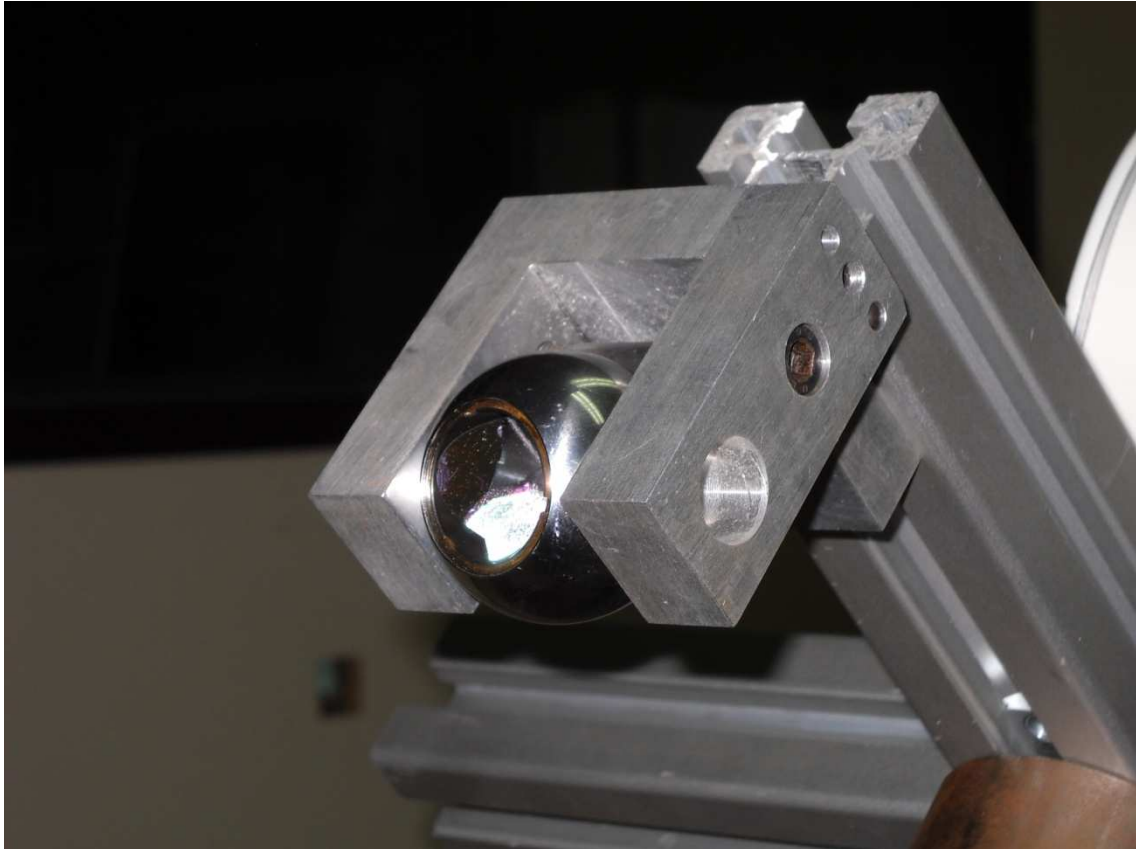


Fig. 6.7 - Reflector y soporte de aluminio

Para la sujeción perfecta del reflector construimos un soporte de aluminio. Este soporte de aluminio es un mecanismo muy simple. Tiene forma de U, donde una de las paredes laterales de la U se desplaza según aprietes un tornillo más o menos. Mediante el apriete adecuado de este tornillo el reflector queda totalmente fijado a dicho soporte.

Un detalle muy importante sobre este montaje es que no se puede interferir entre el laser tracker y el robot, es decir, no se puede cortar el rayo que sale del laser tracker y va hasta el reflector que está situado en el robot. En caso de cortar dicho rayo, habría que volver a comenzar el ensayo que en ese momento se estuviera realizando y volver a ajustar el rayo que sale del laser tracker.

Una vez realizado en montaje podemos comenzar con la captura de datos.

7) OBTENCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Para medir las capacidades técnicas más importantes del robot realizamos los siguientes ensayos:

7.1 PRECISIÓN DE POSICIÓN Y REPETIBILIDAD DE POSICIÓN

7.2 PRECISIÓN DE DISTANCIA Y REPETIBILIDAD DE DISTANCIA

7.3 PRECISIÓN DE LA TRAYECTORIA

7.4 REPETIBILIDAD DE LA TRAYECTORIA

Para un correcto análisis de todos los ensayos nombrados anteriormente, primero hacemos mención del cubo dentro del espacio de trabajo que hemos elegido. El cubo que hemos elegido es el a) como indica la norma, el punto C7 se tomó como origen de coordenadas (base). Quedando situada esa base en las coordenadas {x 320, y -125, z 350} del sistema de referencia global del robot y orientada de la misma forma que el sistema de referencia global del robot (véase figura 7.1).

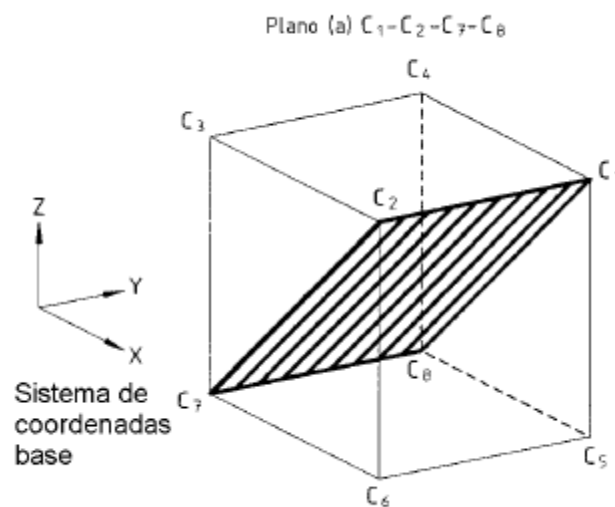


Fig. 7.1 - Cubo dentro del espacio de trabajo

Este cubo es el mismo para todos los ensayo.

Antes de nada, una pequeña aclaración sobre la manipulación del robot. La manipulación del robot en modo manual (frente al trabajo en automático del sistema) tiene dos opciones T1 y T2 (véase figura 7.2). T1 permite la ejecución de programas en modo manual pero aplicando una reducción de velocidad de forma que se opera como máximo al 25% de la velocidad programada. T2 permite la ejecución de programas en modo manual a la velocidad programada (100% de la velocidad).

Dispositivos de seguridad	T1	T2	AUT	AUT EXT
Protección del operario	-	-	Activo	Activo
Pulsador de PARADA DE EMERGENCIA	Activo	Activo	Activo	Activo
Pulsador de hombre muerto	Activo	Activo	-	-
Velocidad reducida	Activo	-	-	-
Modo teclado	Activo	Activo	-	-
Finales de carrera software	Activo	Activo	Activo	Activo

Fig. 7.2 - Tipos de manipulación del robot

Ambos modos de trabajo permiten operar modificando la velocidad de trabajo con un parámetro que va del 0 al 100% y que se aplica sobre la velocidad reducida en T1 y sobre la velocidad programada en T2. Nosotros operamos en T1.

Otro factor importante para llevar a cabo estos ensayos es la velocidad de trabajo. Para los ensayos con trayectoria controlada, es decir, para el ensayo de variación multidireccional de la precisión de posición, para el ensayo de precisión de la trayectoria y para el ensayo de repetibilidad de la trayectoria, la velocidad programada fue de 2 m/s, pero nosotros trabajamos en modo T1 al 10% de la velocidad programada, es decir, para los ensayos con trayectoria controlada la velocidad fue de 50 mm/s.

Por otro lado, para los ensayos sin trayectoria controlada (PTP), es decir, para el ensayo de precisión de posición y repetibilidad de posición y para el ensayo de precisión de la distancia y repetibilidad de la distancia, no se ha programado una velocidad en concreto para el desplazamiento, lo que se ha programado son los parámetros de los ejes para que la velocidad angular de los mismos en el desplazamiento sea del 100% respecto a la velocidad de giro alcanzable o máxima, esta velocidad angular máxima depende de la trayectoria, de la posición y de la carga. En especificaciones indica que esta velocidad es de 8m/s.

Los movimientos PTP o lo que es lo mismo, sin trayectoria controlada, se han programado al 100% de la capacidad del robot y se han ejecutado al 2.5 % de la capacidad del robot

7.1) PRECISIÓN DE POSICIÓN Y REPETIBILIDAD DE POSICIÓN

Para realizar este ensayo lo dividimos en tres apartados:

- Precisión de posición (AP)
- Repetibilidad de posición (RP)
- Variación multidireccional de la precisión de posición (vAP)

7.1.1) Precisión de posición (AP)

Este ensayo expresa la desviación entre las posiciones programadas y la media de las posiciones alcanzadas cuando el robot se aproxima, siempre en la misma dirección, al punto programado.

La precisión de posición se divide en:

- *Precisión de posicionamiento*: Es la diferencia entre la posición de un punto programado y el baricentro de las posiciones alcanzadas (véase figura 7.3).

- *Precisión de orientación*: Es la diferencia entre la orientación de un punto programado y el promedio de las orientaciones alcanzadas.

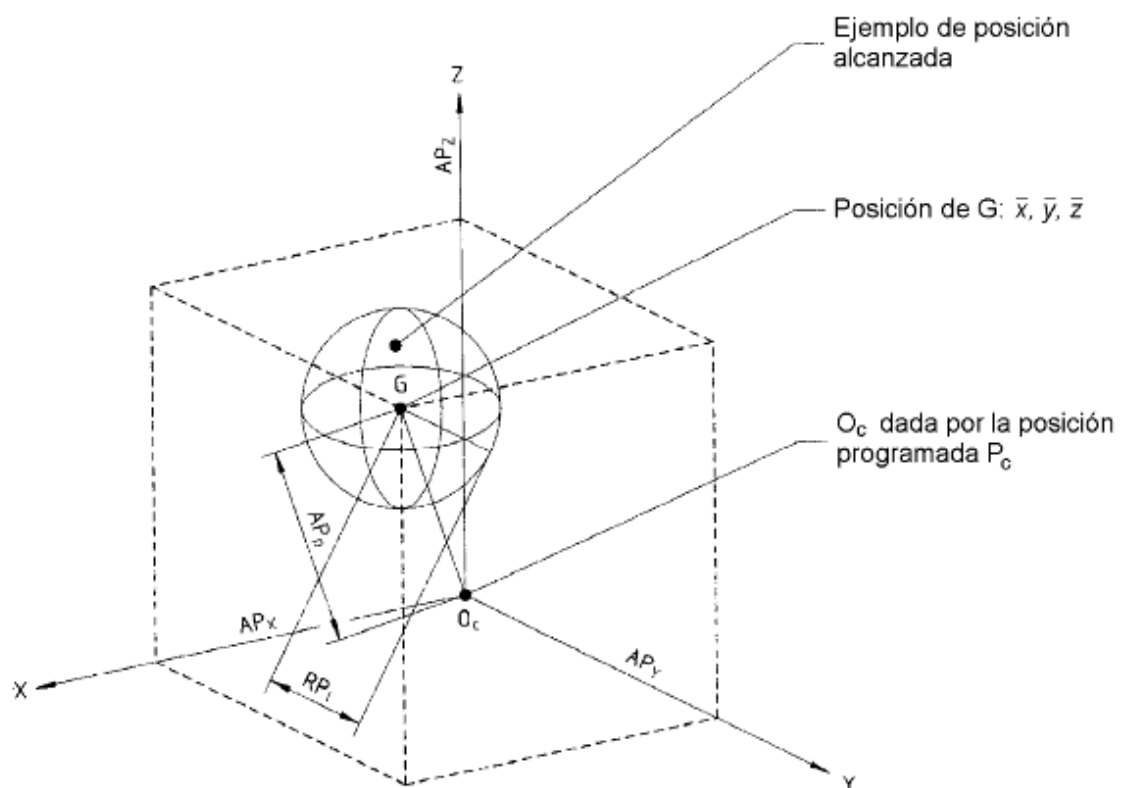


Fig. 7.3 - Precisión de posicionamiento y repetibilidad

El ensayo de precisión de posición durará unos 16 minutos aproximadamente, ya que el número de ciclos es de 30 (según la norma).

En nuestro caso sólo realizaremos los cálculos para la precisión de posicionamiento.

Para calcular la precisión de posicionamiento utilizamos las siguientes fórmulas:

$$AP_P = \sqrt{(\bar{x} - x_c)^2 + (\bar{y} - y_c)^2 + (\bar{z} - z_c)^2}$$

$$AP_x = (\bar{x} - x_c)$$

$$AP_y = (\bar{y} - y_c)$$

$$AP_z = (\bar{z} - z_c)$$

con

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j$$

$$\bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_j$$

\bar{x} , \bar{y} y \bar{z} son las coordenadas del baricentro de la nube de puntos obtenidos tras repetir la misma posición n veces.

x_c , y_c y z_c son las coordenadas de los puntos programados.

x_j , y_j y z_j son las coordenadas de la j-ésima posición alcanzada.

Una vez que ya tenemos las fórmulas con las que calcular la precisión de posicionamiento nos disponemos a realizar la captura de datos

De dicha captura de datos obtenemos, los datos recogidos por el laser tracker y los datos recogidos por el robot a partir de ángulos. Pero los datos recogidos por el laser tracker tienen que estar expresados en el sistema de referencia del robot, para ello calculamos la matriz de transformación homogénea. Esta matriz de transformación homogénea la obtenemos mediante el método de mínimos cuadrados.

Operando los datos obtenidos del laser tracker y la matriz de transformación homogénea obtenemos los datos del laser tracker en el sistema de referencia del robot. Y por tanto, ya podemos calcular la precisión de posicionamiento.

Operando con las formulas anteriormente mencionadas según dice la norma, obtenemos la precisión de posicionamiento para los cinco puntos:

- $AP_5 = 0.20618373 \text{ mm.} = 206 \text{ }\mu\text{m.}$
- $AP_4 = 0.49666813 \text{ mm.} = 496 \text{ }\mu\text{m.}$
- $AP_3 = 0.34739395 \text{ mm.} = 347 \text{ }\mu\text{m.}$
- $AP_2 = 0.28490163 \text{ mm.} = 284 \text{ }\mu\text{m.}$
- $AP_1 = 0.31512692 \text{ mm.} = 315 \text{ }\mu\text{m.}$

El valor de AP_5 , AP_4 , AP_3 , AP_2 y AP_1 va a ser igual en los 30 ciclos.

7.1.2) Repetibilidad de posición (RP)

La repetibilidad de posición expresa la dispersión de las posiciones alcanzadas tras n visitas repetidas en la misma dirección a una posición programada.

Para una posición dada, la repetibilidad se expresa por

- El valor de RP_1 que es el radio de la esfera cuyo centro es el baricentro (véase figura 7.3).
- La dispersión de ángulos $\pm 3S_a$, $\pm 3S_b$, $\pm 3S_c$ respecto a la media de valores \bar{a} , \bar{b} y \bar{c} donde S_a , S_b y S_c son las desviaciones estándar.

En este apartado sólo calcularemos la repetibilidad de posicionamiento.

Para calcular la repetibilidad de posicionamiento utilizaremos las siguientes fórmulas:

$$RP_1 = \bar{l} + 3S_l$$

con

$$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_j$$

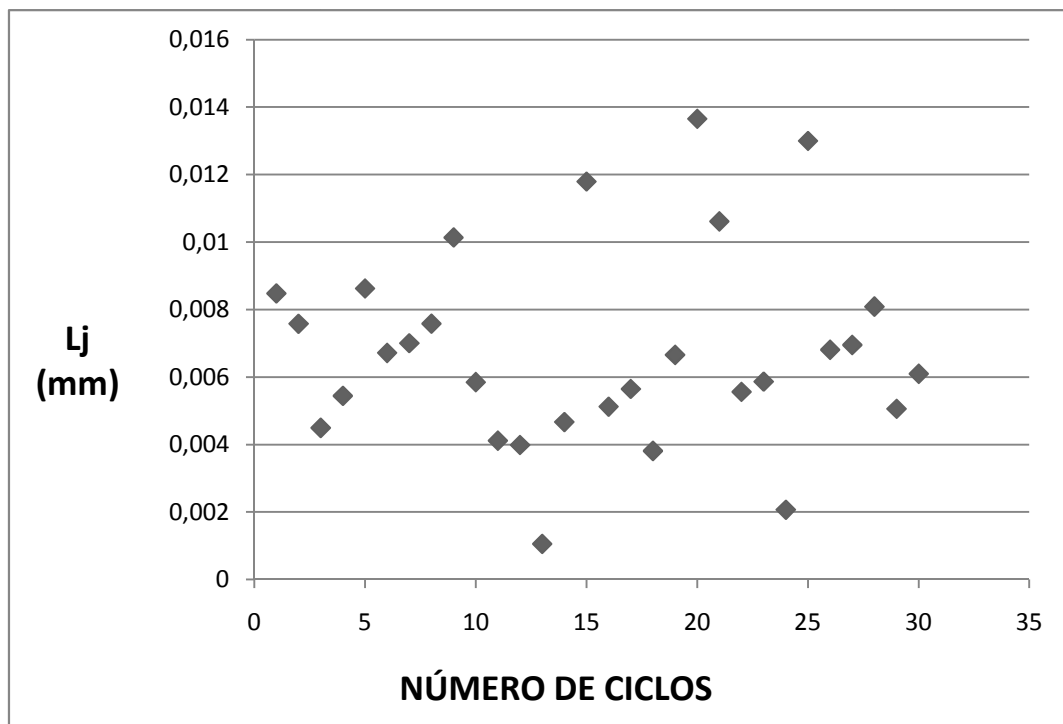
$$l_j = \sqrt{(x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2 + (z_j - \bar{z})^2}$$

Estos valores están definidos en el apartado anterior 7.1.1.

Los valores que utilizaremos para el cálculo de la repetibilidad de posicionamiento van a ser los mismos que los utilizados para el cálculo de la precisión de posicionamiento, ya que el ensayo es el mismo. Por tanto, no es necesario volver a describir como hemos realizado el cambio de sistema de referencia, del laser tracker, al sistema de referencia del robot.

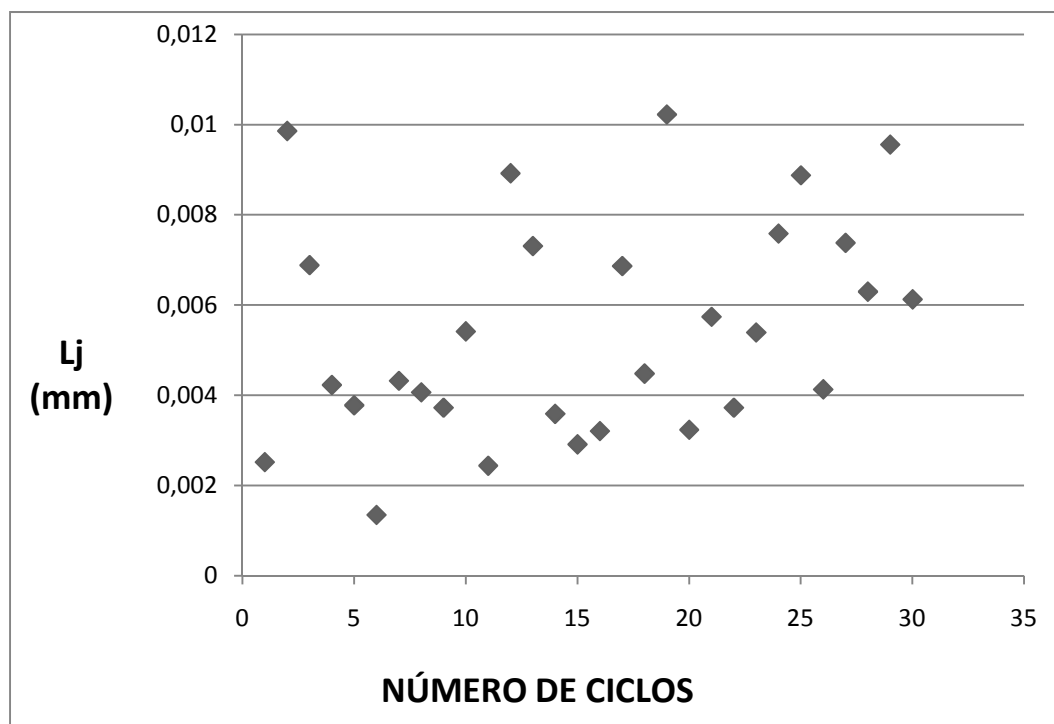
Como ya tenemos los valores del ensayo los representamos gráficamente para poder observarlos mejor:

- Representación del punto 5 (L_j):



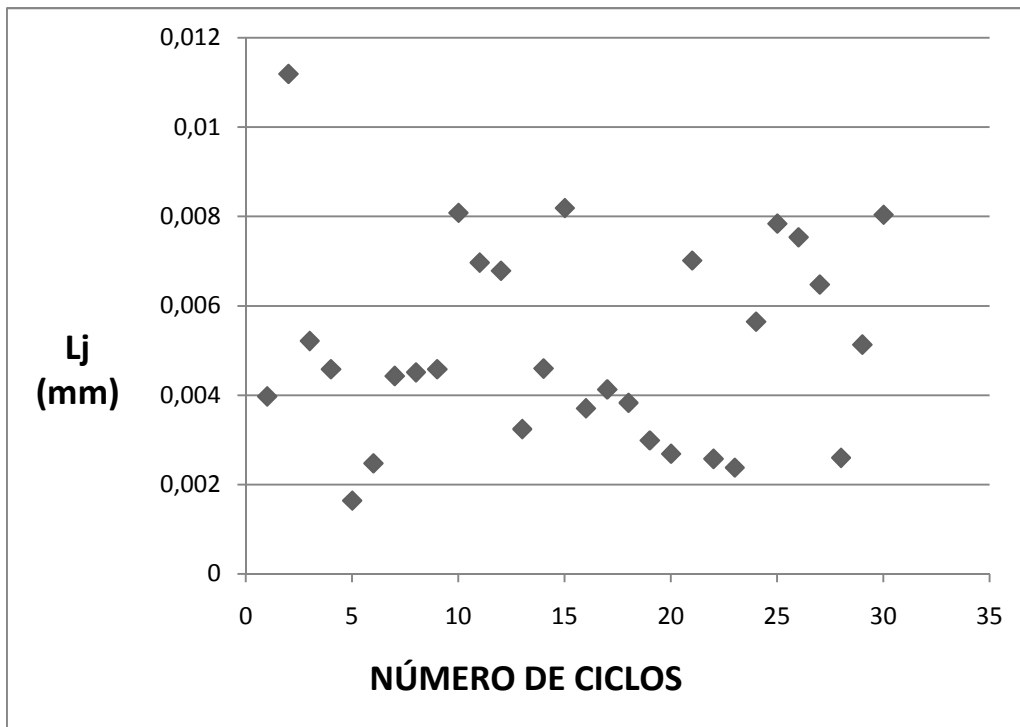
En la representación del punto 5 podemos observar que todos los valores están dentro del rango ± 0.02 mm. También observamos un orden aleatorio de los puntos.

- Representación del punto 4 (L_j):



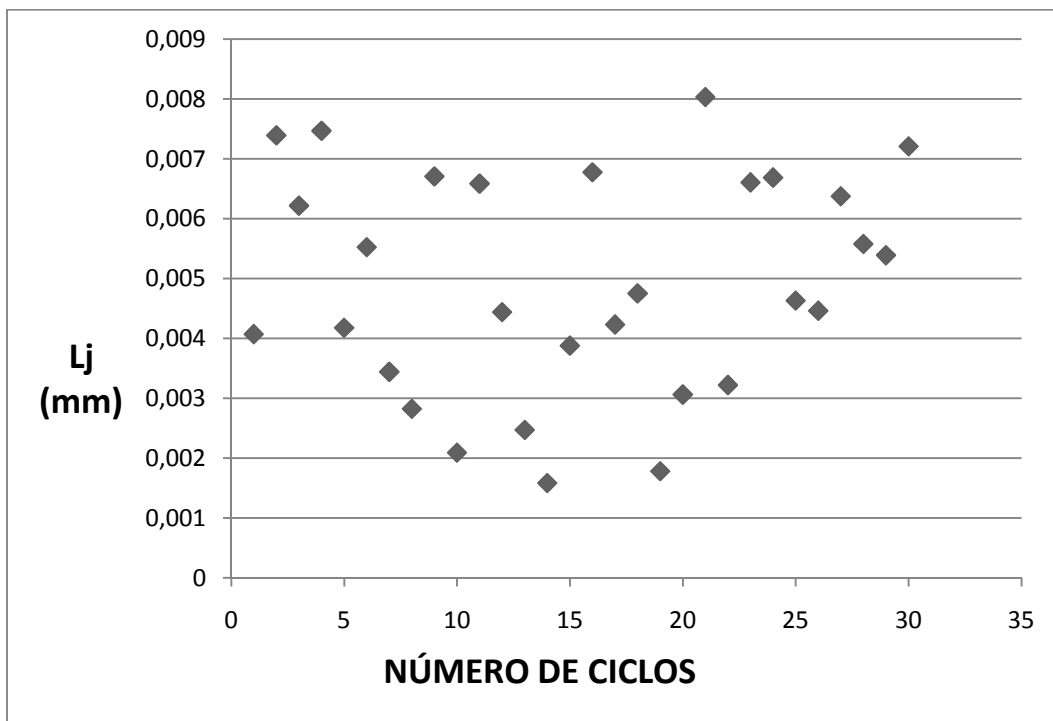
En esta gráfica podemos observar que todos los puntos están dentro del rango ± 0.02 mm. También observamos un orden aleatorio de los puntos.

- Representación del punto 3 (L_j):



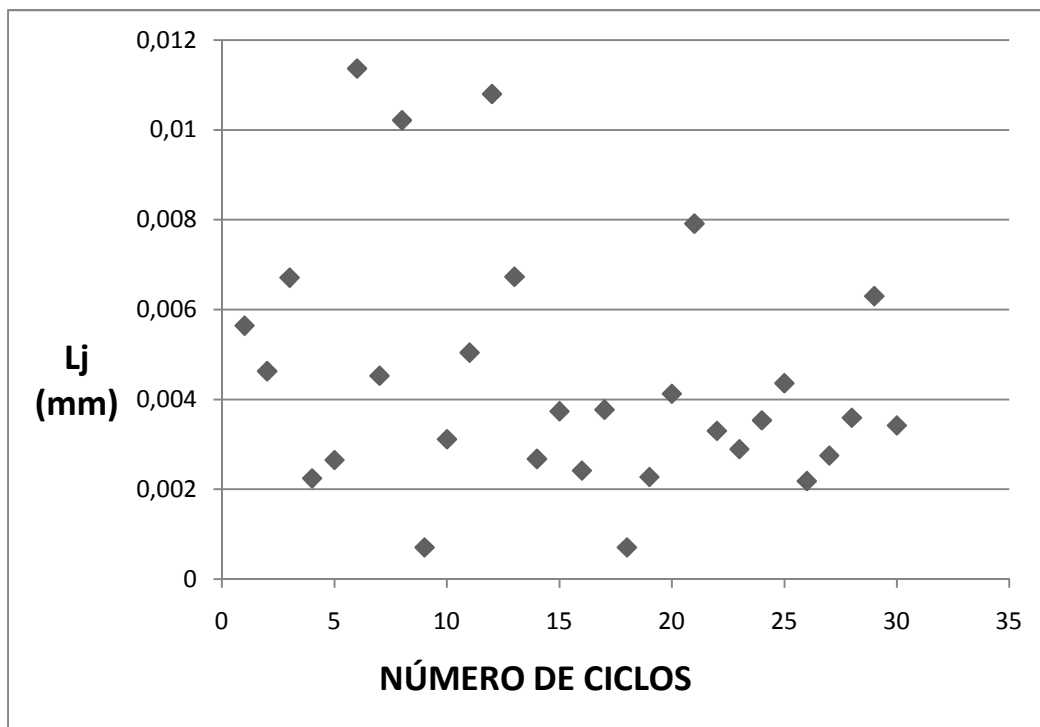
En este punto podemos observar que todos los valores están dentro de rango ± 0.02 mm.

- Representación del punto 2 (L_j):



En esta gráfica podemos observar que todos los valores están dentro del rango ± 0.02 mm.

- Representación del punto 1 (L_j):



En la representación del punto uno podemos observar que todos los valores están dentro del rango ± 0.02 mm. También observamos un orden aleatorio de los puntos.

Teniendo los valores del ensayo y las formulas, podemos calcular la repetibilidad de posición. Los resultados obtenidos para la repetibilidad de posición para los cinco puntos según la norma son:

- $RP_5 = 0.01550501$ mm. = 15 μ m.

- $RP_4 = 0.01274348$ mm. = 12 μ m.

- $RP_3 = 0.01191974$ mm. = 11 μ m.

- $RP_2 = 0.01046479$ mm. = 10 μ m.

- $RP_1 = 0.01263351$ mm. = 12 μ m.

7.1.3 Variación multidireccional de la precisión de posición (v_{AP})

La variación multidireccional de la precisión de posición expresa la dispersión de la media de las posiciones alcanzadas cuando se visita n veces la misma posición programada desde tres direcciones ortogonales diferentes (véase figura 7.4).

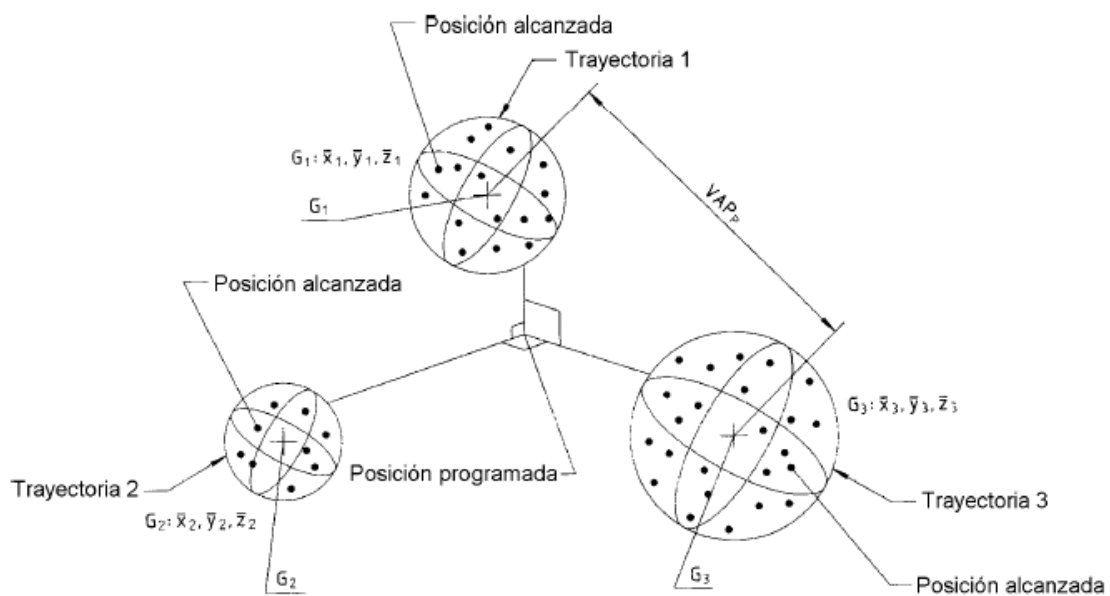


Fig. 7.4 - Variación multidireccional de la precisión de posición

El tiempo de este ensayo es de 60 minutos aproximadamente y el número de ciclos es de 30 (según la norma).

- vAP_p es la distancia máxima entre los baricentros de la nube de puntos alcanzados al final de cada trayectoria diferente.

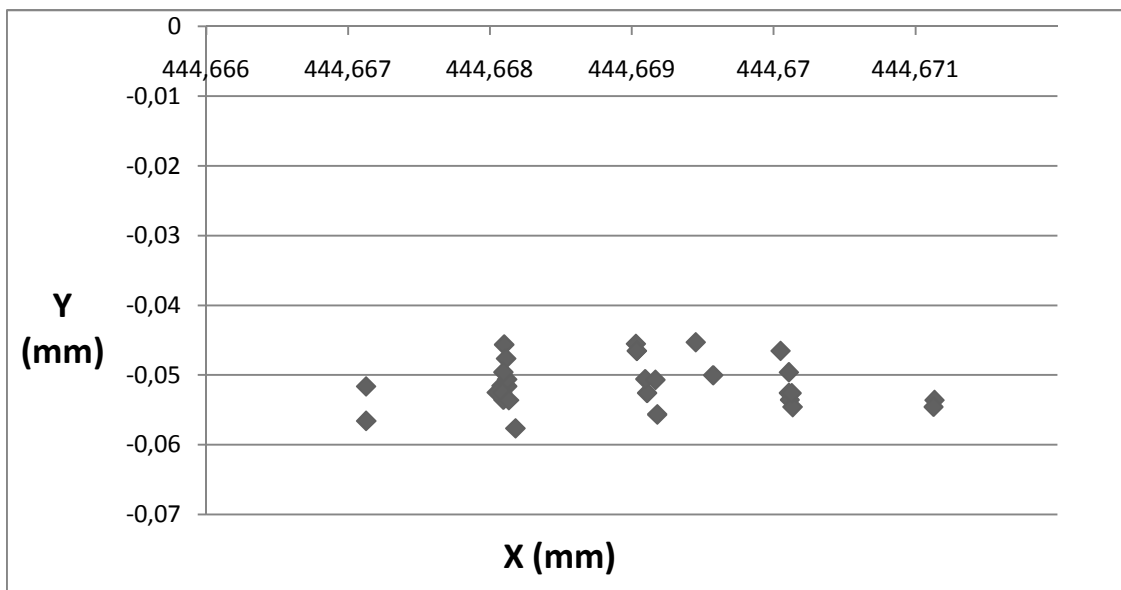
La variación multidireccional de la precisión de posición se calcula como sigue:

$$vAP_p = \max. \sqrt{(\bar{x}_h - \bar{x}_k)^2 + (\bar{y}_h - \bar{y}_k)^2 + (\bar{z}_h - \bar{z}_k)^2} \quad h, k = 1, 2, 3$$

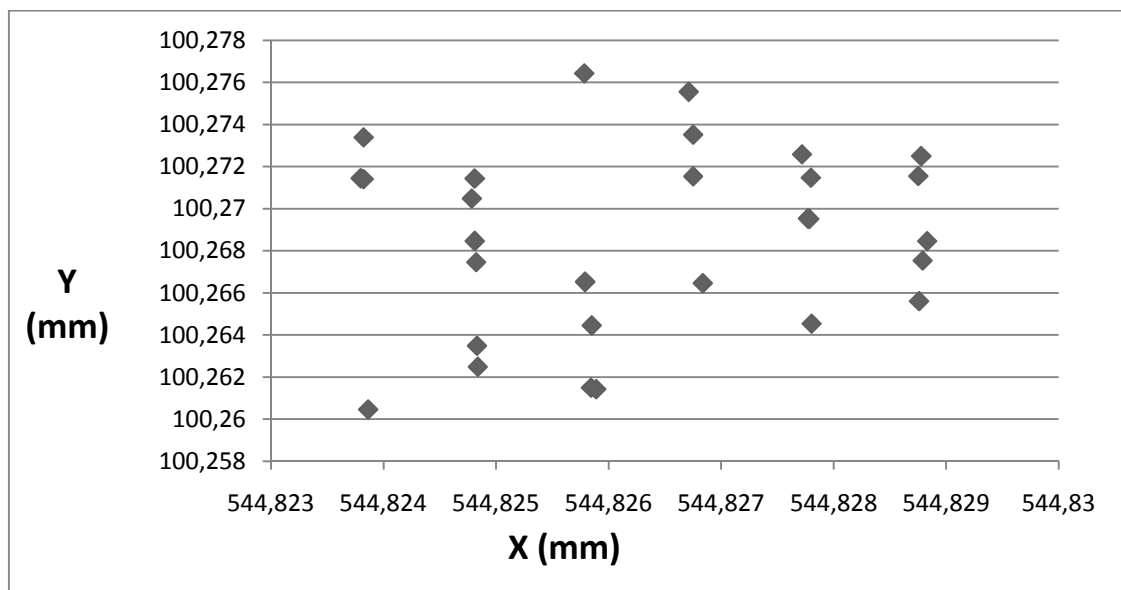
En este ensayo hemos obtenido los datos del robot a partir de ángulos y los datos del laser tracker. Pero los datos del laser tracker los tenemos que expresar en el sistema de referencia del robot, para ello usamos la matriz de transformación homogénea obtenida por el método de los mínimos cuadrados.

Como ya tenemos los datos del ensayo realizaremos la representación gráfica de cada punto, del punto 1, del punto 2 y del punto 4 en las tres direcciones X, Y y Z, en el plano XY.

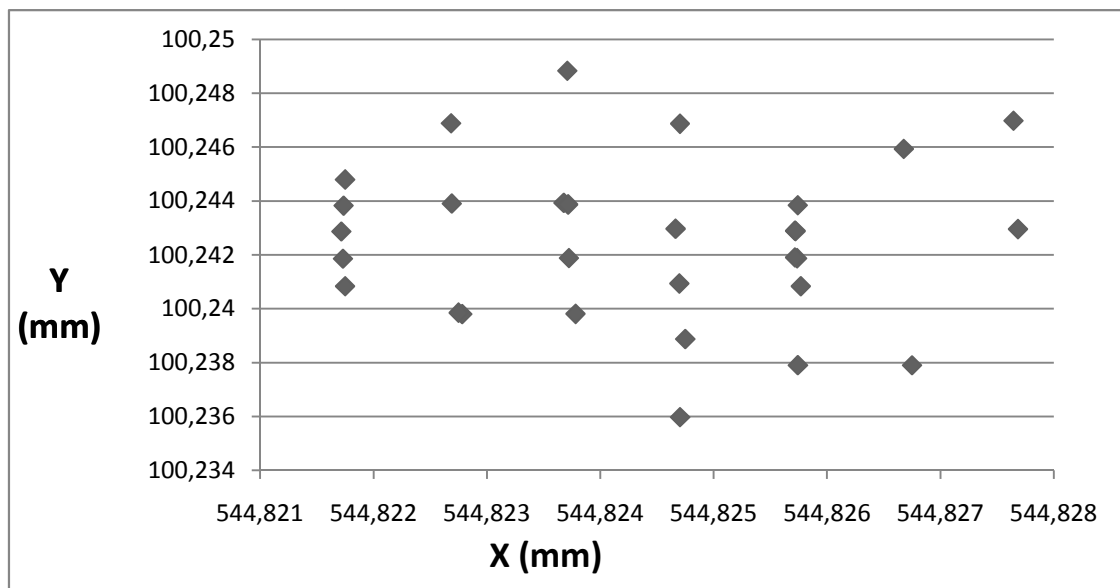
- Representación del punto 1. Dirección Z:



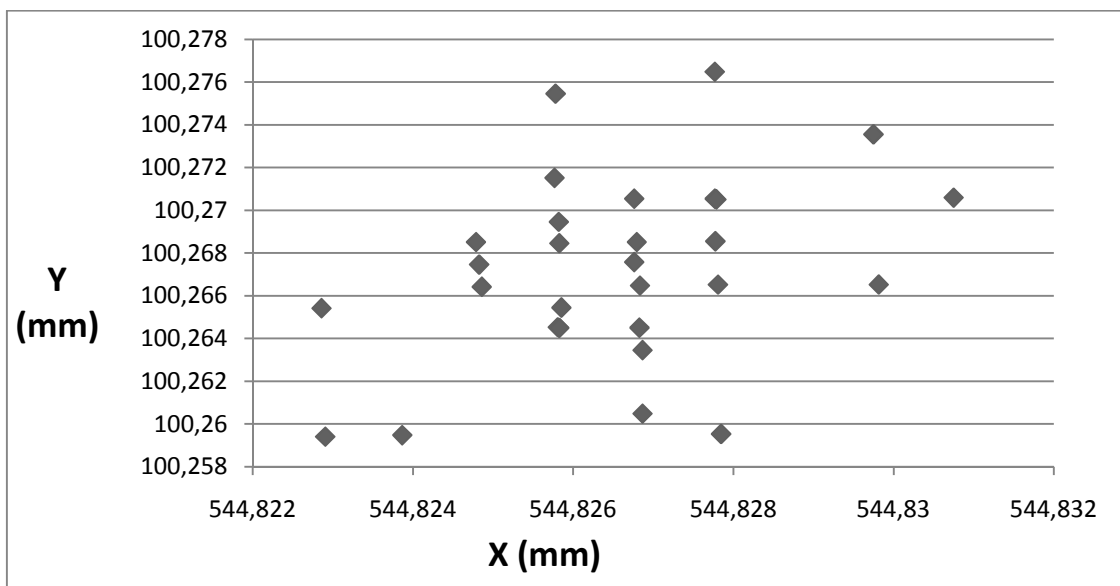
- Representación del punto 2. Dirección X:



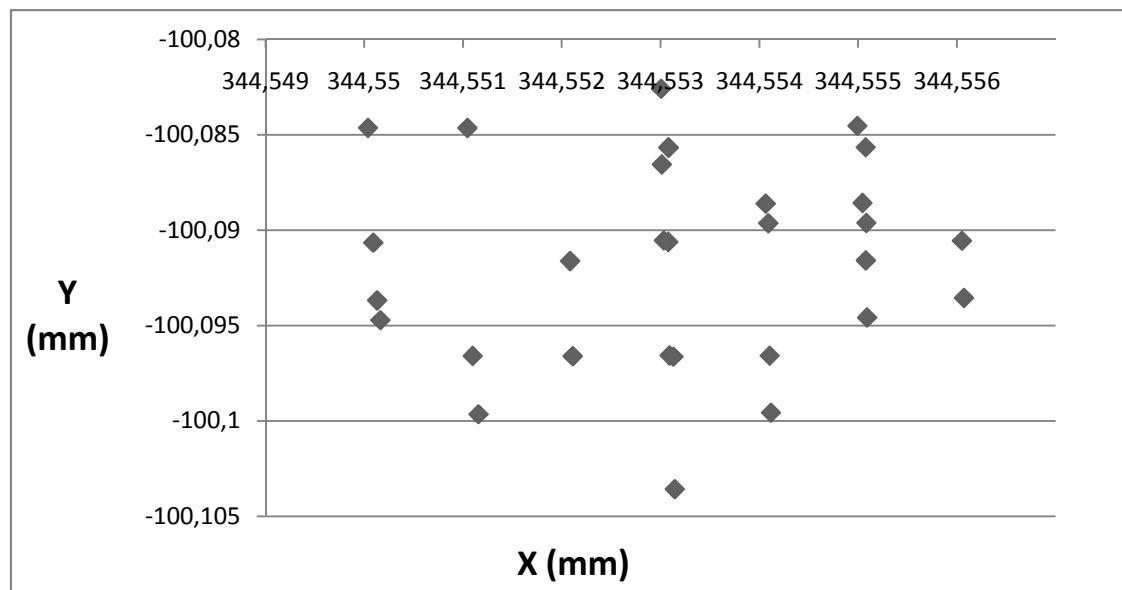
- Representación del punto 2. Dirección Y:



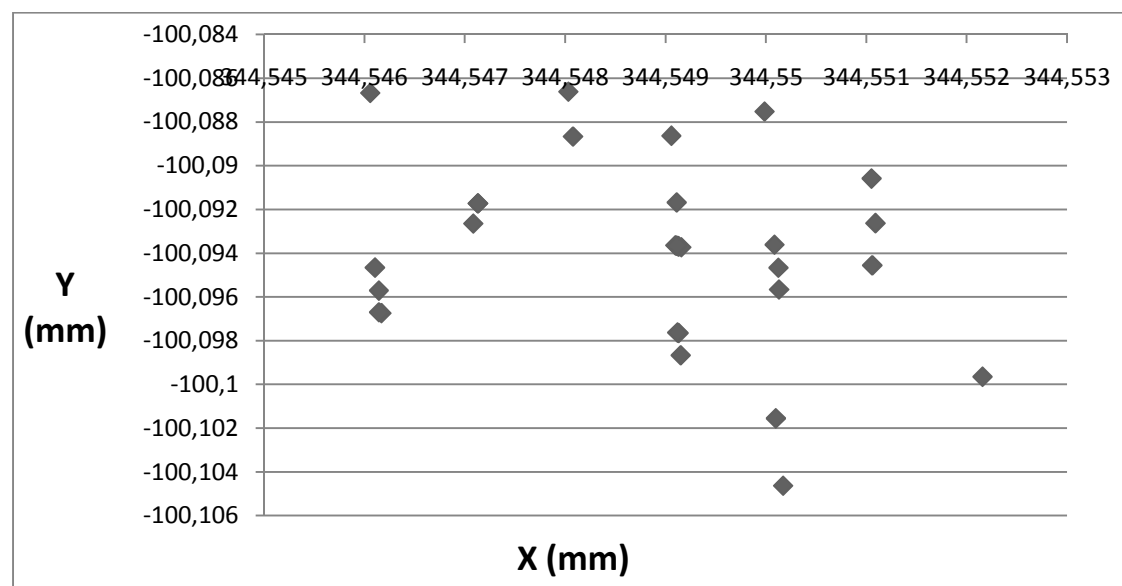
- Representación del punto 2. Dirección Z:



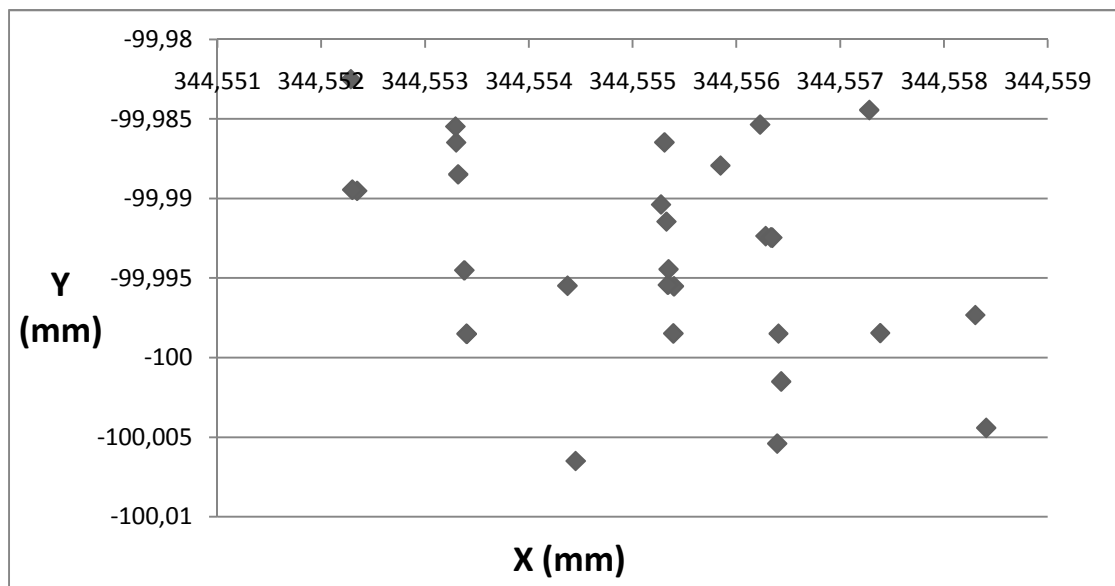
- Representación del punto 4. Dirección X:



- Representación del punto 4. Dirección Y:



- Representación del punto 4. Dirección Z:



En todas las gráficas anteriormente mostradas se puede observar una dispersión de todos los puntos capturados en el plano XY. En el resto de planos (XZ, YZ) se vería algo similar a lo mostrado en estas gráficas.

Teniendo la fórmula y los datos ya podemos calcular la variación multidireccional de la precisión de posición. Los resultados que hemos obtenido para la variación multidireccional de la precisión de posición para el punto 1, para el punto 2 y para el punto 4, según dice la norma, son:

$$- v_{AP_1} = 0.011827098 \text{ mm.} = 11 \text{ }\mu\text{m. (DIRECCIÓN YZ)}$$

$$- v_{AP_2} = 0.047381314 \text{ mm.} = 47 \text{ }\mu\text{m. (DIRECCIÓN XY)}$$

$$- v_{AP_4} = 0.101657871 \text{ mm.} = 10 \text{ }\mu\text{m. (DIRECCIÓN YZ)}$$

7.2) PRECISIÓN DE DISTANCIA Y REPETIBILIDAD DE DISTANCIA

Estas características sólo son aplicables a los robots con la capacidad de programación off-line o introducción manual de datos.

Este ensayo lo realizaremos en dos apartados:

- Precisión en la distancia (AD)
- Repetibilidad en la distancia (RD)

7.2.1) Precisión en la distancia (AD)

Expresa la desviación en el posicionamiento y orientación entre la distancia programada y la media de las distancias alcanzadas.

Dadas las posiciones programadas P_{c1} y P_{c2} y las posiciones alcanzadas P_{1j} , P_{2j} , la precisión en la distancia de posicionamiento es la diferencia de distancias entre P_{c1} , P_{c2} y P_{1j} , P_{2j} (véase figura 7.5) y la distancia repetida n veces.

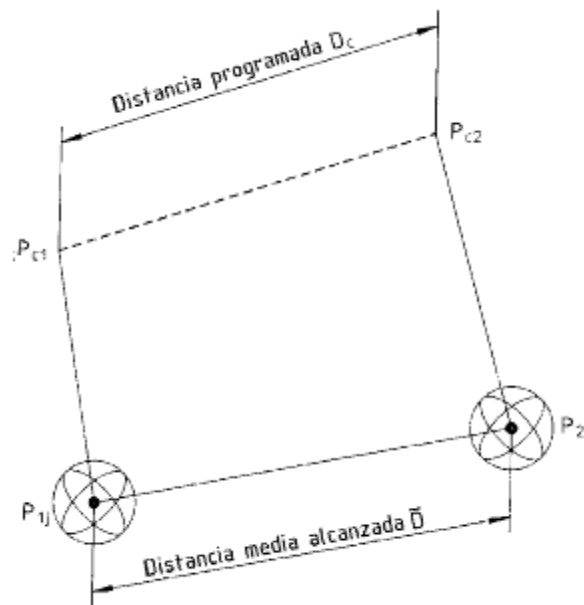


Fig.7.5 - Precisión en la distancia

La precisión en la distancia se determina mediante los dos factores; precisión en la distancia de posicionamiento y precisión en la distancia de orientación.

En este ensayo nosotros sólo vamos a calcular la precisión en la distancia de posicionamiento. Dicho ensayo va a tener una duración de 7 minutos aproximadamente.

La precisión en la distancia de posicionamiento se calcula como sigue:

$$AD_P = \bar{D} - D_c$$

donde

$$\bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_j$$

$$D_j = |P_{1j} - P_{2j}| = \sqrt{(x_{1j} - x_{2j})^2 + (y_{1j} - y_{2j})^2 + (z_{1j} - z_{2j})^2}$$

$$D_c = |P_{c1} - P_{c2}| = \sqrt{(x_{c1} - x_{c2})^2 + (y_{c1} - y_{c2})^2 + (z_{c1} - z_{c2})^2}$$

con

x_{c1}, y_{c1}, z_{c1} como las coordenadas de P_{c1} disponibles en el controlador del robot

x_{c2}, y_{c2}, z_{c2} como las coordenadas de P_{c2} disponibles en el controlador del robot

x_{1j}, y_{1j}, z_{1j} como las coordenadas de P_{1j}

x_{2j}, y_{2j}, z_{2j} como las coordenadas de P_{2j}

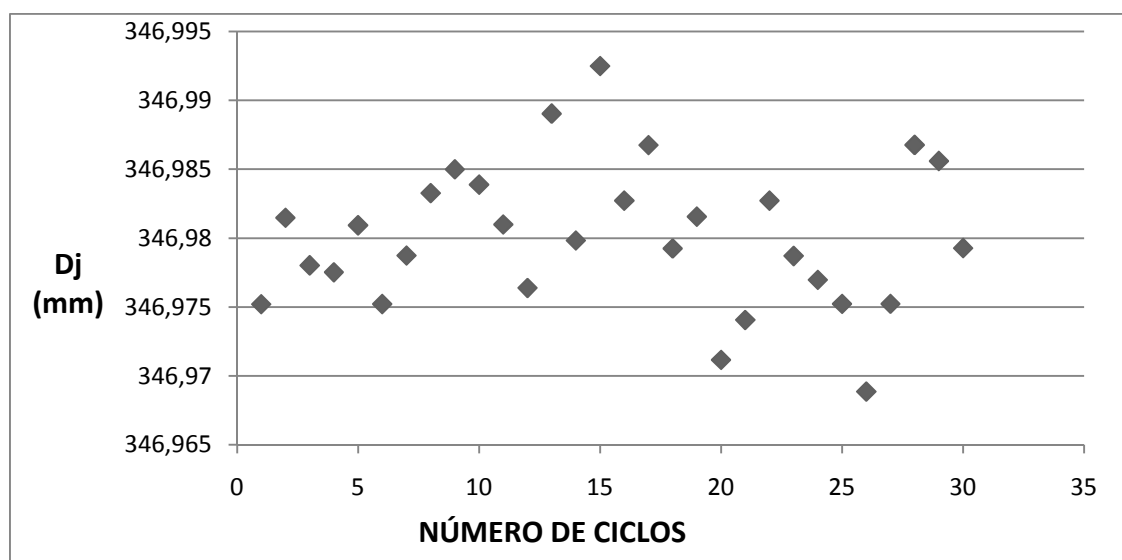
n como el número de repeticiones

Una vez realizado este ensayo obtenemos los datos capturados por el laser tracker y los datos capturados por el robot a partir de ángulos.

Para poder operar con los datos capturados por el laser tracker es necesario expresarlos en el sistema de referencia del robot. Para ello usamos la matriz de transformación homogénea. Esta matriz de transformación homogénea la obtenemos por medio del método de mínimos cuadrados.

Teniendo los datos del laser tracker expresados en el sistema de referencia del robot, podemos proceder al cálculo de la precisión de la distancia de posicionamiento.

De los resultados calculados obtenemos este gráfico:



En esta gráfica podemos observar la dispersión de los puntos capturados por el laser tacker.

Operando según la norma, el valor de la precisión de la distancia de posicionamiento es de:

$$- AD_p = 0.5719898 \text{ mm.} = 571 \text{ }\mu\text{m.}$$

7.2.2) Repetibilidad en la distancia (RD)

La repetibilidad en la distancia es la proximidad entre varias distancias alcanzadas para la misma distancia programada, repetida n veces en la misma dirección.

La repetibilidad en la distancia incluye la repetibilidad de posicionamiento y orientación.

En nuestro caso sólo calcularemos la repetibilidad de posicionamiento o también llamada repetibilidad en la distancia para una distancia programada.

Los datos que usaremos para calcular la repetibilidad de posicionamiento van a ser los mismos que los usados para calcular la precisión de la distancia de posicionamiento, ya que el ensayo es el mismo.

La repetibilidad en la distancia para una distancia programada dada se calcula como sigue:

$$RD = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_j - \bar{D})^2}{n-1}}$$

Teniendo los datos del ensayo y la fórmula según la norma, ya podemos calcular la repetibilidad en la distancia para una distancia programada.

El resultado obtenido es:

$$\text{- RD} = 0.015724217 \text{ mm.} = 15 \mu\text{m.}$$

7.3) PRECISIÓN DE LA TRAYECTORIA

La precisión de la trayectoria caracteriza la habilidad de un robot para mover su interfaz mecánico a lo largo de una trayectoria programada en la misma dirección n veces.

La precisión de trayectoria se determina por dos factores:

- *Precisión del posicionamiento en la trayectoria AT_p* : Es la distancia máxima entre la posición de la trayectoria programada y los baricentros G_i , de los n ciclos medidos, para cada número de puntos calculados (m) a lo largo de la trayectoria (véase figura 7.6).

- *Precisión en la orientación de la trayectoria*: Es la diferencia entre las orientaciones programadas y el promedio de las orientaciones alcanzadas.

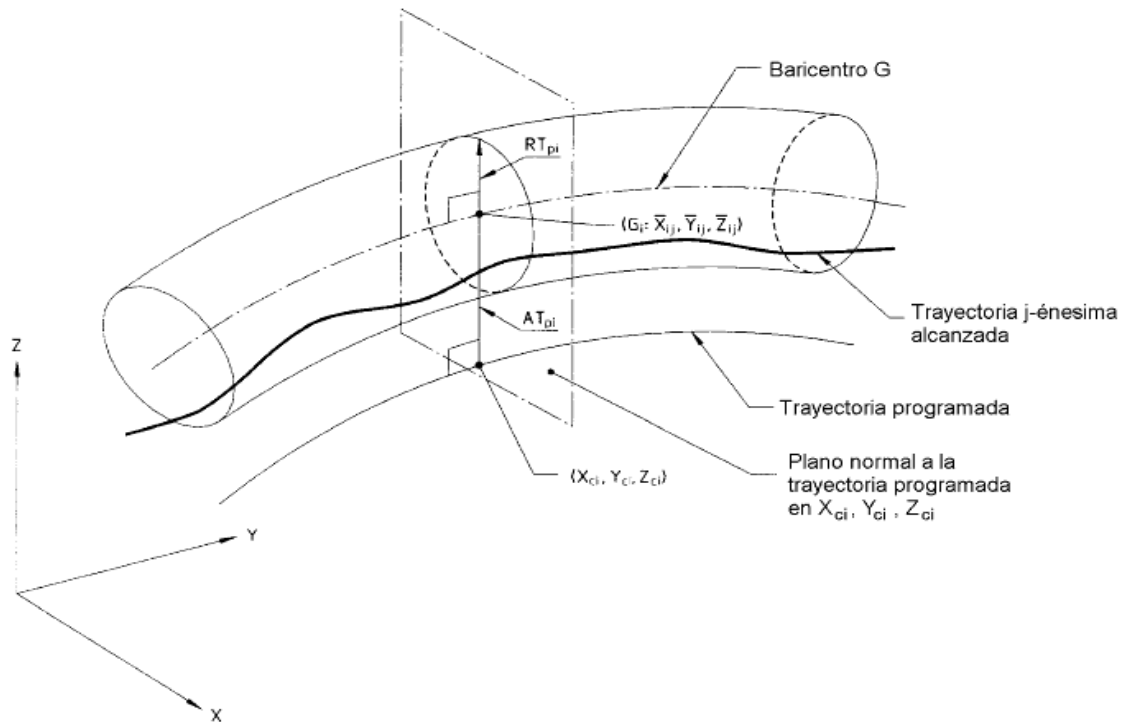


Fig. 7.6 - Precisión de la trayectoria y repetibilidad de la trayectoria para una trayectoria programada

En este ensayo sólo vamos a calcular la precisión del posicionamiento en la trayectoria. Se calcula como sigue:

$$AT_p = \max. \sqrt{(\bar{x}_i - x_{ci})^2 + (\bar{y}_i - y_{ci})^2 + (\bar{z}_i - z_{ci})^2} \quad i = 1 \dots m$$

donde

$$\bar{x}_i = \frac{l}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad \bar{y}_i = \frac{l}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij} \quad \bar{z}_i = \frac{l}{n} \sum_{j=1}^n z_{ij}$$

con

x_{ci} , y_{ci} y z_{ci} son las coordenadas del punto i-ésimo de la trayectoria programada

x_{ij} , y_{ij} y z_{ij} son las coordenadas de la intersección de la trayectoria alcanzada j-ésima y el plano normal i-ésimo.

En este caso la precisión del posicionamiento en la trayectoria la calculamos para tres casos diferentes:

- Trayectoria lineal
- Trayectoria circular grande de diámetro 200 mm.
- Trayectoria circular pequeña de diámetro 20 mm.
- *Trayectoria lineal*: El ensayo de precisión del posicionamiento en la trayectoria con una trayectoria lineal va a tener una duración de 56 segundos aproximadamente cada 4 trayectorias, teniendo en total 12 trayectorias. En cada trayectoria se van a capturar 200 puntos.

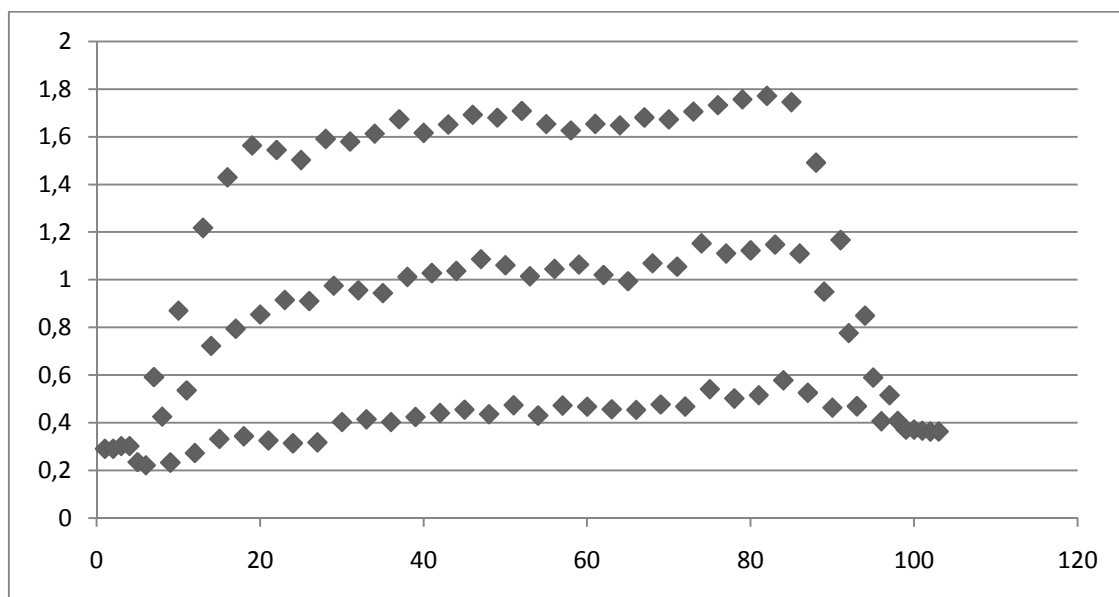
Una vez realizado este ensayo obtenemos los puntos capturados por el laser tracker y los puntos capturados por el robot a partir de los ángulos. Los datos capturados por el laser tracker los tenemos que expresar en el sistema de referencia del robot, para ello utilizaremos la matriz de transformación homogénea. Dicha matriz de transformación homogénea la obtenemos por el método de mínimos cuadrados.

Una vez que tenemos los datos del laser tracker expresados en el sistema de referencia del robot podemos proceder al cálculo de la precisión del posicionamiento en la trayectoria para una trayectoria lineal.

El resultado que hemos obtenido para la precisión del posicionamiento en la trayectoria para una trayectoria lineal es:

$$- AT_p = 1.7711829 \text{ mm.} = 1771 \text{ }\mu\text{m.}$$

La gráfica que hemos obtenido es la siguiente:



Como podemos observar en esta gráfica los valores a partir del valor 103 empiezan a ser prácticamente los mismos. Por eso no están representados en la gráfica.

- *Trayectoria circular grande de diámetro 200 mm.*: El ensayo de precisión del posicionamiento en la trayectoria con una trayectoria circular grande de diámetro 200 mm. va a tener una duración de 59 segundos aproximadamente cada 4 trayectorias, teniendo en total 12 trayectorias. En cada trayectoria se van a capturar 200 puntos.

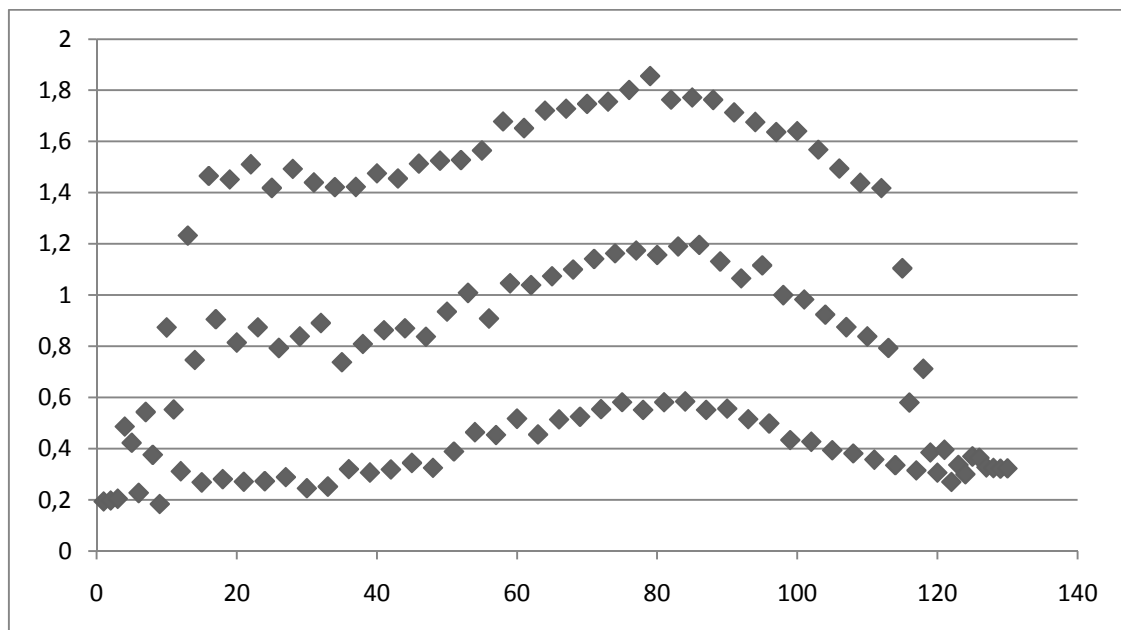
Los datos que usaremos para el cálculo de la precisión del posicionamiento en la trayectoria con una trayectoria circular grande van a ser diferentes a los de la precisión del posicionamiento en la trayectoria con una trayectoria lineal, pero el tratamiento de dichos datos va a ser idéntico.

De la captura de datos obtenemos, los datos capturados por el robot a partir de los ángulos y los datos capturados por el laser tracker. Los datos capturados por el laser tracker los tenemos que expresar en el sistema de referencia del robot y para ello utilizamos la matriz de transformación homogénea

Por tanto, operando con los nuevos datos y con la fórmula según la norma, el resultado de la precisión del posicionamiento en la trayectoria con una trayectoria circular grande de diámetro 200 mm. es:

$$- AT_p = 1.8558408 \text{ mm.} = 1855 \text{ }\mu\text{m.}$$

En este caso la gráfica obtenida es la siguiente:



En esta gráfica también podemos observar que los valores a partir del valor 130 empiezan a ser prácticamente idénticos. Por eso no están representados en la gráfica.

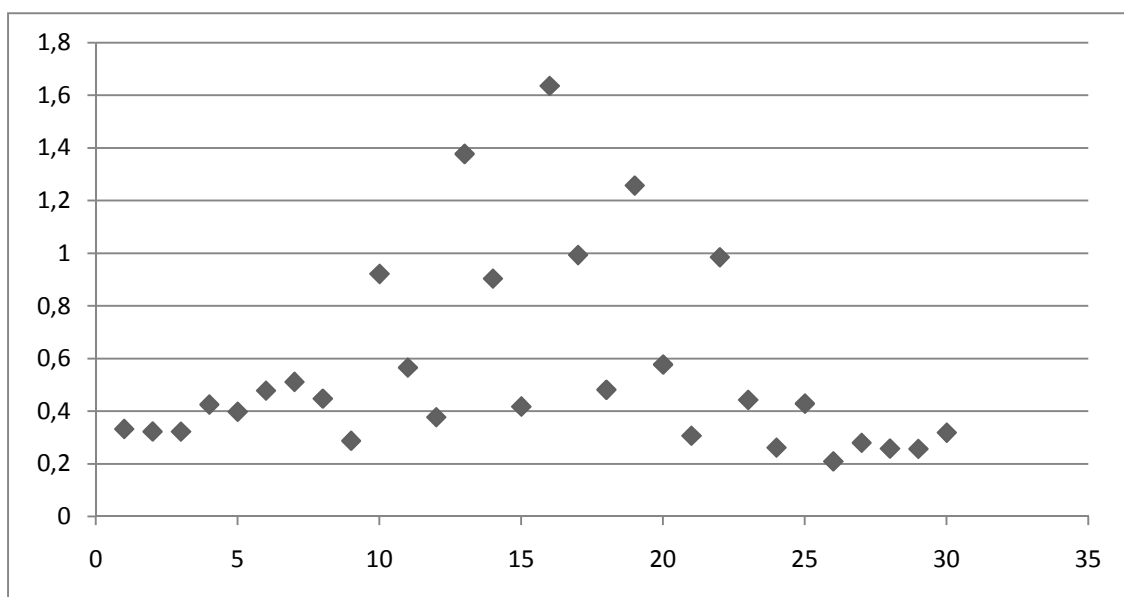
- *Trayectoria circular pequeña de diámetro 20 mm.*: El ensayo de precisión del posicionamiento en la trayectoria con una trayectoria circular pequeña de diámetro 20 mm. va a tener una duración de 52 segundos aproximadamente, ya que tiene un total de 10 trayectorias. En cada trayectoria se van a capturar 50 puntos.

Una vez realizado el ensayo obtenemos los datos capturados por el laser tracker y los datos capturados por el robot a partir de los ángulos. El tratamiento de estos datos para poder obtener la precisión del posicionamiento en la trayectoria con una trayectoria circular pequeña de diámetro 20 mm. va a ser idéntico al de los dos casos anteriores, pero con distintos valores.

Así que teniendo los datos del ensayo y la fórmula según la norma, procedemos al cálculo de la precisión del posicionamiento en la trayectoria con una trayectoria circular pequeña de diámetro 20 mm. El resultado obtenido es:

$$- AT_p = 1.63527981 \text{ mm.} = 1635 \mu\text{m.}$$

La gráfica que hemos obtenido de este ensayo es:



En este gráfico se puede observar, que no están representados los 50 valores obtenidos porque a partir del valor 35 son todos prácticamente iguales.

7.4) REPETIBILIDAD DE LA TRAYECTORIA

La repetibilidad de la trayectoria expresa el grado de proximidad entre las trayectorias alcanzadas para una misma trayectoria programada repetida n veces.

Para una trayectoria dada seguida n veces en la misma dirección, la repetibilidad de la trayectoria se expresa por:

- RT_p es el máximo RT_{pi} que es igual al radio de un círculo en el plano normal con su centro en la línea del baricentro (véase figura 7.6).

- La máxima de las dispersiones de los ángulos respecto al valor medio en los diferentes puntos calculados.

En este caso sólo vamos a calcular la repetibilidad en la trayectoria. Se calcula como sigue:

$$RT_p = \text{máx. } RT_{pi} = \text{máx. } [\bar{l}_i + 3S_{li}] \quad i = 1 \dots m$$

donde

$$\bar{l}_i = \frac{l}{n} \sum_{j=1}^n l_{ij}$$

$$S_{li} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_{ij} - \bar{l}_i)^2}{n-1}}$$

$$l_{ij} = \sqrt{(x_{ij} - \bar{x}_i)^2 + (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 + (z_{ij} - \bar{z}_i)^2}$$

Estos valores están definidos en el apartado anterior 7.3.

La repetibilidad en la trayectoria la calculamos para tres casos diferentes:

- Trayectoria lineal
- Trayectoria circular grande de diámetro 200 mm.
- Trayectoria circular pequeña de diámetro 20 mm.

Comenzamos estudiando el primer caso.

- *Trayectoria lineal*: Las características de este ensayo son las mismas que para el ensayo de precisión del posicionamiento en la trayectoria con una trayectoria lineal, por tanto los datos y los valores de los datos van a ser los mismos.

Teniendo los datos del ensayo y la fórmula según la norma, procedemos al cálculo de la repetibilidad en la trayectoria con trayectoria lineal.

El resultado obtenido es:

$$\text{- } RT_p = 1.9747052 \text{ mm.} = 1974 \text{ } \mu\text{m.}$$

- *Trayectoria circular grande de diámetro 200 mm.*: Las características y datos para este ensayo, son los mismos que hemos utilizado para el cálculo de la precisión del posicionamiento en la trayectoria con una trayectoria circular grande de diámetro 200 mm.

Por tanto, calculamos la repetibilidad en la trayectoria con una trayectoria circular grande de diámetro 200mm. según la norma y obtenemos que:

$$\text{- } RT_p = 2.1265385 \text{ mm.} = 2126 \text{ }\mu\text{m.}$$

- *Trayectoria circular pequeña de diámetro 20 mm.*: Este ensayo tiene las mismas características que el ensayo de precisión del posicionamiento en la trayectoria con una trayectoria circular pequeña de diámetro 20 mm., y por tanto, los datos que necesitamos para el cálculo de la repetibilidad en la trayectoria con una trayectoria circular pequeña de diámetro 20 mm. son los mismos.

Por tanto, sólo tenemos que operar con la fórmula de la repetibilidad en la trayectoria según dice la norma.

El resultado obtenido de la repetibilidad de la trayectoria con una trayectoria circular pequeña de diámetro 20 mm. es de:

$$\text{- } RT_p = 1.63527981 \text{ mm.} = 1635 \text{ }\mu\text{m.}$$

8) RESUMEN DE LOS RESULTADOS

- PRECISIÓN DE POSICIÓN

$$AP_5 = 0.20618373 \text{ mm.} = 206 \text{ }\mu\text{m.}$$

$$AP_4 = 0.49666813 \text{ mm.} = 496 \text{ }\mu\text{m.}$$

$$AP_3 = 0.34739395 \text{ mm.} = 347 \text{ }\mu\text{m.}$$

$$AP_2 = 0.28490163 \text{ mm.} = 284 \text{ }\mu\text{m.}$$

$$AP_1 = 0.31512692 \text{ mm.} = 315 \text{ }\mu\text{m.}$$

El valor de AP_5 , AP_4 , AP_3 , AP_2 y AP_1 va a ser igual en los 30 ciclos.

- REPETIBILIDAD DE POSICIÓN

$$RP_5 = 0.01550501 \text{ mm.} = 15 \text{ }\mu\text{m.}$$

$$RP_4 = 0.01274348 \text{ mm.} = 12 \text{ }\mu\text{m.}$$

$$RP_3 = 0.01191974 \text{ mm.} = 11 \text{ }\mu\text{m.}$$

$$RP_2 = 0.01046479 \text{ mm.} = 10 \text{ }\mu\text{m.}$$

$$RP_1 = 0.01263351 \text{ mm.} = 12 \text{ }\mu\text{m.}$$

- VARIACIÓN MULTIDIRECCIONAL DE LA PRECISIÓN DE POSICIÓN

$$vAP_1 = 0.011827098 \text{ mm.} = 11 \text{ }\mu\text{m.} \text{ (DIRECCIÓN YZ)}$$

$$vAP_2 = 0.047381314 \text{ mm.} = 47 \text{ }\mu\text{m.} \text{ (DIRECCIÓN XY)}$$

$$vAP_4 = 0.101657871 \text{ mm.} = 10 \text{ }\mu\text{m.} \text{ (DIRECCIÓN YZ)}$$

- PRECISIÓN EN LA DISTANCIA

$$AD_p = 0.5719898 \text{ mm.} = 571 \text{ }\mu\text{m.}$$

- REPETIBILIDAD EN LA DISTANCIA

$$RD = 0.015724217 \text{ mm.} = 15 \text{ }\mu\text{m.}$$

- PRECISIÓN DE LA TRAYECTORIA

- *Trayectoria lineal*

$$AT_p = 1.7711829 \text{ mm.} = 1771 \text{ }\mu\text{m.}$$

- *Trayectoria circular grande de diámetro 200 mm.*

$$AT_p = 1.8558408 \text{ mm.} = 1855 \text{ }\mu\text{m.}$$

- *Trayectoria circular pequeña de diámetro 20 mm.*

$$AT_p = 1.63527981 \text{ mm.} = 1635 \text{ }\mu\text{m.}$$

- REPETIBILIDAD DE LA TRAYECTORIA

- *Trayectoria lineal*

$$RT_p = 1.9747052 \text{ mm.} = 1974 \text{ }\mu\text{m.}$$

- *Trayectoria circular grande de diámetro 200 mm.*

$$RT_p = 2.1265385 \text{ mm.} = 2126 \text{ }\mu\text{m.}$$

- *Trayectoria circular pequeña de diámetro 20 mm.*

$$RT_p = 1.63527981 \text{ mm.} = 1635 \text{ }\mu\text{m.}$$

Como comentario a los resultados obtenidos se puede decir que los resultados en los ensayos de repetibilidad son en general mucho mejores que los ensayos de precisión, de modo que el robot comete principalmente un error sistemático grande y un error aleatorio pequeño como se ve en las gráficas de repetibilidad mostradas anteriormente. Para tareas repetitivas, que son las que en el 90% de los casos realiza un robot, es mucho más importante la repetibilidad que la precisión, dado que los movimientos se programan por aprendizaje.

En cuanto a los resultados obtenidos de los ensayos de trayectoria se puede decir que los resultados son elevados, fundamentalmente debido a que hemos tomado el error máximo de todos los máximos.

9) CONCLUSIONES

A lo largo de esta memoria se han ido explicando los ensayos realizados según la NORMA UNE-EN ISO 9283 en un robot de seis ejes para verificar el comportamiento de dicho robot cuando está operando. También se ha explicado la forma en la que se programa dicho robot, aunque en este caso no se adjunten los programas de los ensayos realizados debido al gran volumen de estos y que no eran datos relevantes para el análisis del comportamiento del robot de seis ejes.

De este modo ensayo por ensayo hemos ido analizando y explicando los resultados obtenidos a lo largo de toda la memoria.

Como conclusión final se puede decir que este robot cumple (y/o mejora si es el caso) con las especificaciones del fabricante respecto a repetibilidad. Respecto a exactitud el fabricante no facilita datos, sin embargo, de los ensayos realizados se puede extraer los valores para corregir la exactitud en la posición en las situaciones estudiadas.

10) ANEXOS

Todos los datos capturados por el robot y por el laser tracker para todos los ensayos, las gráficas de todos los ensayos y todas las operaciones realizadas para todos los ensayos, están recogidos en una hoja excel que se adjunta en el formato digital de la página web, según dice la nueva norma.

11) BIBLIOGRAFÍA

Para la realización de esta memoria ha sido de gran ayuda:

- NORMA UNE-EN ISO 9283:1998 ROBOTS MANIPULADORES INDUSTRIALES
- KUKA SYSTEM SOFTWARE (KSS)

Y también han sido de gran utilidad las siguientes páginas web:

- www.leica.com
- www.faro.com