



**Universidad Nacional de Educación a  
Distancia**

**Escuela Técnica Superior de Ingenieros  
Industriales**

**Departamento de Ingeniería de Construcción y  
Fabricación**

**TÍTULO DE LA TESIS**

**“DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA  
PREDICTIVA DE PRECISION Y ACABADO  
SUPERFICIAL APLICADA AL  
MECANIZADO ROBOTIZADO”**

**Alumno:**

**D. Iván Iglesias Sánchez**

**Director:**

**Dr. D. Miguel Ángel Sebastián Pérez**

**Codirector:**

**Dr. D. José Enrique Ares Gómez**

**Vigo, 22 de Noviembre de 2015.**



## AGRADECIMIENTOS

---

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a los profesores Dr. José Enrique Ares Gómez y Dr. Miguel Ángel Sebastián Pérez por darme la oportunidad de realizar esta tesis doctoral bajo su dirección. El apoyo y confianza recibido me han motivado a completar este trabajo, sin el cual no hubiese sido posible. También deseo expresarles mi gratitud por contribuir a mi formación como investigador.

Por supuesto, el agradecimiento más profundo y sentido va para mi familia. Sin su apoyo y colaboración no habría sido imposible llevar a cabo esta dura tarea. A mis padres, María Dolores y Manuel, por su ejemplo de lucha y honestidad; a mi hermano José Manuel por su paciencia y generosidad; a mis hermanas Miriam y Rebeca por su tenacidad y superación; a mis suegros María Jesús y Peregrino por su apoyo y cariño: amigos y demás familia... Va por ustedes!

A mis compañeros de trabajo, Anxo Gutiérrez, Marcos Piñeiro y Rodrigo González, agradecer las aportaciones realizadas en los proyectos en que hemos colaborado, y que tanto han contribuido al desarrollo de este trabajo.

Finalmente, agradecer al Centro Tecnológico AIMEN por haber puesto a mi disposición los medios necesarios para completar las partes experimentales de esta tesis doctoral.

Dedico este trabajo a mi amada y querida esposa, por su cariño y agradable carácter, así como por el apoyo y ánimo que me brinda cada día para alcanzar nuevas metas, tanto profesionales como personales.

*"Para ti, Ángeles, por ser el amor de vida!"*

# RESUMEN

---

Hoy en día, en un ambiente industrial tan cambiante y con la reducción cada vez más acusada de la vida del producto, se hace patente la necesidad de producir bienes y servicios de alto valor añadido utilizando medios productivos versátiles y económicos.

En este sentido la celda de mecanizado mediante robot antropomórfico representa una alternativa viable, cuya principal problemática son la desviación TCP y la vibración durante la trayectoria de trabajo, que dependen fundamentalmente de la mecánica del robot, la magnitud de las fuerzas de corte y su dirección de acción predominante.

La carencia de reglas que guíen a los usuarios de celdas robotizadas en el mecanizado, así como la variabilidad de la calidad de la operación, confieren un mayor grado de incertidumbre sobre el posible resultado del proceso de conformado. La precisión y calidad superficial de la pieza a fabricar queda supeditada a la selección de estrategias y condiciones de corte intuitivas basadas en la experiencia, o al nefasto método de prueba y error.

El presente proyecto de tesis de tesis doctoral resuelve la problemática relativa a la precisión del mecanizado robotizado mediante un desarrollo teórico fuertemente orientado a su aplicación en taller. Como alternativa a los sofisticados modelos cinemático y dinámico desarrollados por diversos autores, se establece un analogía entre la mecánica extendida del robot antropomórfico y la dinámica generalizada al espacio cartesiano, definiendo un modelo reducido equivalente del comportamiento de robot referenciado al TCP de la herramienta de corte. Esto favorece de la orientación relativa del vector resultante de la fuerza de mecanizado respecto a los ejes principales de rigidez del robot, aprovechando al máximo el potencial de la mecánica del sistema, y de esta manera permite estimar la desviación del TCP y la vibración durante la trayectoria de conformado.

Este análisis pretende evaluar la influencia de la magnitud y dirección las fuerzas de corte sobre la dinámica del sistema robotizado, mediante un nuevo modelo representativo de la interacción entre la mecánica del robot y las fuerzas de corte, así como a través de las frecuencias o modos de vibración durante el mecanizado, para lograr predecir la desviación de trayectoria programada que se podría alcanzar para unas hipotéticas condiciones de corte.

También se plantea como importante novedad científica el identificar condiciones de corte más favorables para la celda robotizada de mecanizado, lo que podría permitir el determinar experimentalmente rangos de trabajo estables en los que se obtenga un equilibrio ventajoso entre la mecánica del robot y las fuerzas de corte. Se persigue la evaluación y determinación de las variables que influyen sobre la rigidez del sistema; como pueden ser la configuración de ejes del robot, la ubicación de la pieza a mecanizar en el área de trabajo, la selección de los parámetros de corte más adecuadas para mejor aprovechamiento del sistema robotizado en términos de calidad de operación.

Para satisfacer la doble motivación con la que se plantea esta investigación, aportar novedades científicas al campo de estudio y su necesaria transferencia y aplicación industrial, se propone como finalidad principal de la Tesis doctoral la identificación de reglas o procedimientos de permitan al usuario mejorar la calidad del resultado de las operaciones de conformado, lo que ha posibilitado la elaboración de una "metodología predictiva de precisión y acabado superficial en el mecanizado robotizado".

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

---

<b>I.</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>15</b>
<b>II.</b>	<b>OBJETIVOS, ALCANCE E INNOVACIONES .....</b>	<b>16</b>
<b>III.</b>	<b>ESQUEMA ORGANIZATIVO DE LA TESIS.....</b>	<b>18</b>
	<b>CAPÍTULO I: ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE DE SISTEMAS Y TÉCNICAS MECANIZADO ROBOTIZADO .....</b>	<b>19</b>
<b>1.</b>	<b>Introducción al mecanizado robotizado .....</b>	<b>19</b>
<b>2.</b>	<b>Estado del arte de mecanizado robotizado e industria .....</b>	<b>23</b>
<b>2.1.</b>	<b>Aplicaciones en materiales plásticos .....</b>	<b>23</b>
<b>2.2.</b>	<b>Aplicaciones en yeso .....</b>	<b>28</b>
<b>2.3.</b>	<b>Aplicaciones en madera.....</b>	<b>28</b>
<b>2.4.</b>	<b>Aplicaciones en aluminio.....</b>	<b>30</b>
<b>3.</b>	<b>Análisis de la robótica actual en el mecanizado de materiales blandos .....</b>	<b>30</b>
<b>4.</b>	<b>Limitaciones actuales del mecanizado robotizado .....</b>	<b>32</b>
<b>4.1.</b>	<b>Expectativas de utilización del mecanizado robotizado .....</b>	<b>37</b>
<b>4.2.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>37</b>
<b>5.</b>	<b>Avance del estado de la ciencia y la técnica mediante la investigación propuesta.....</b>	<b>38</b>
	<b>CAPÍTULO II: DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA PREDICTIVA DE APLICACIÓN AL MECANIZADO ROBOTIZADO.. .....</b>	<b>39</b>
<b>1.</b>	<b>Desarrollo del modelo de interacción entre la mecánica del robot y el proceso de corte .....</b>	<b>39</b>
<b>1.1.</b>	<b>Modelo representativo de la mecánica del robot.....</b>	<b>40</b>
<b>1.1.1.</b>	<b>Modelo extendido de la cinemática y dinámica del robot .....</b>	<b>40</b>
<b>1.1.2.</b>	<b>Modelo reducido equivalente de la mecánica del robot .....</b>	<b>43</b>

1.1.3. Modelado de las fuerzas de corte.....	46
1.2. Procedimiento para determinar las matrices de rigidez y amortiguamiento .....	48
1.3. Procedimiento para monitorización.....	50
1.3.1. Sensorización de las vibraciones.....	50
1.3.2. Sensorización de los esfuerzos sobre el robot.....	51
1.3.3. Monitorización de esfuerzos durante el mecanizado .....	52
<b>2. Desarrollo de la metodología predictiva aplicada al mecanizado robotizado .....</b>	<b>54</b>
<b>3. Desarrollo de la celda experimental.....</b>	<b>55</b>
3.1. Diseño, desarrollo e integración del sistema prototipo.....	56
3.1.1. Selección del robot industrial.....	57
3.1.2. Selección del electrohusillo de mecanizado .....	63
3.1.3. Integración de la celda experimental .....	65
3.2. Método calibración de TCP robot y wobj mesa .....	67
<b>CAPÍTULO III: VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA DESARROLLADA .....</b>	<b>73</b>
<b>4. Validación del método de calibración de la celda.....</b>	<b>73</b>
4.1. Diseño de la pieza de prueba y material.....	74
4.2. Herramientas de corte utilizadas .....	75
4.3. Estrategias de corte y programación CAM .....	75
4.3.1. Contorneado común .....	76
4.3.2. Contorneado discontinuo.....	77
4.4. Simulación de las trayectorias .....	77
4.4.1. Método 1: Contorneado común .....	78
4.4.2. Método 2: Contorneado discontinuo.....	78
4.4.3. Método 3: Contorneado continuo coordinando robot y mesa .....	78
4.5. Prueba de mecanizado.....	79

4.6. Mediciones .....	80
<b>5. Caracterización de la celda experimental .....</b>	<b>82</b>
5.1. Definición de la trayectoria de corte .....	82
5.2. Determinación de las matrices de rigidez y amortiguamiento .....	83
5.2.1. Ensayo de impacto y análisis modal.....	85
<b>6. Validación del modelo reducido equivalente.....</b>	<b>86</b>
<b>7. Validación del modelo de interacción entre la mecánica del robot y el proceso de corte .....</b>	<b>87</b>
7.1. Comparativa resultados.....	88
7.2. Conclusiones del modelo .....	93
<b>8. Optimización experimental de los parámetros del proceso.....</b>	<b>94</b>
8.1. Descripción de los ensayos .....	94
8.2. Comparativa resultados.....	97
<b>9. Extensión del modelo de interacción a operaciones de planeado de superficies. ....</b>	<b>98</b>
9.1. Descripción del ensayo.....	98
9.2. Mediciones .....	99
<b>10. Conclusiones y transferencia de resultados .....</b>	<b>100</b>
<b>CAPÍTULO IV: APORTACIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO .....</b>	<b>101</b>
<b>CAPÍTULO V: BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>103</b>

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

---

Ilustración 1.1 Perspectiva de aplicación de robots para operaciones de mecanizado en diferentes materiales y etapas de la fabricación .....	21
Ilustración 1.2 Comparación entre complejidad y tamaño de la pieza.....	24
Ilustración 1.3 Comparación cualitativa de los 9 sistemas respecto al tamaño y complejidad ...	25
Ilustración 1.4 Principales características de los sistemas estudiados.....	25
Ilustración 1.5 Esquema de instalación .....	26
Ilustración 1.6 Resumen del Procedimiento .....	26
Ilustración 1.7 Detalle proceso de desbastado del material sobrante. ....	27
Ilustración 1.8 Herramienta montada en el brazo robotizado .....	27
Ilustración 1.9 Cabina de mecanizado .....	28
Ilustración 1.10 Detalle del end-effector .....	28
Ilustración 1.11 Fuerzas y geometría de la herramienta .....	29
Ilustración 1.12 Equipo para mecanizado de madera .....	29
Ilustración 1.13 Furniture chattering tool unit .....	30
Ilustración 2.14 Modelo Interacción mecánica robot(A) y fuerzas de corte(B) .....	39
Ilustración 2.15 Modelado del Robot con la inclinación en los ejes virtuales .....	41
Ilustración 2.16 Representación simplificada del robot ABB IRB 6660 .....	42
Ilustración 2.17 Modelado de holguras en engranajes .....	42
Ilustración 2.18 Representación analógica del robot ABB IRB 6660.....	44
Ilustración 2.19 Representación del sistema cartesiano en TCP del robot .....	45
Ilustración 2.20 Representación analógica del robot ABB IRB 6660.....	45
Ilustración 2.21 Representación analógica del robot ABB IRB 6660.....	45
Ilustración 2.22 Rigidez global para una dirección. ....	46
Ilustración 2.23 Discretización de la geometría de la viruta.....	47
Ilustración 2.24 Cálculo del espesor de viruta $h(\varphi,z)$ . ....	47
Ilustración 2.25 Cutting force calculation.....	47

Ilustración 2.26 Esquema y formulación básica del procedimiento .....	48
Ilustración 2.27 Grafica de posición lineal frente a tiempo de estabilización.....	49
Ilustración 2.28 Imagen y especificaciones del compensador.....	49
Ilustración 2.29 Montaje del equipo.....	50
Ilustración 2.30 Esquema Acelerómetro.....	51
Ilustración 2.31 Montaje rela del prototipo.....	52
Ilustración 2.32 Tarjeta de adquisición de datos. ....	52
Ilustración 2.33 Interface del sistema medición de fuerza.....	53
Ilustración 2.34 Interface del software NI-DAQmx.....	53
Ilustración 2.35 Disposición robot y mesa rotativa .....	55
Ilustración 2.36 Disposición robot y mesa rotativa .....	56
Ilustración 2.37 Electrohusillo y datos de peso, CG G y TCP virtual .....	57
Ilustración 2.38 Robot IRB 6660- 205/1.9 .....	59
Ilustración 2.39 Área trabajo del robot IRB 6660- 205/1.9.....	59
Ilustración 2.40 Caracteristica de movimiento del robot según ISO .....	60
Ilustración 2.41 Carga máxima admitida según posición de CG del caabezal de mecanizado ..	61
Ilustración 2.42 Mesa rotativa MTC 2000 .....	62
Ilustración 2.43 Controladora IRC5 .....	63
Ilustración 2.44 Electrohusillo PERON SPEED PS TCV 1 SP .....	63
Ilustración 2.45 Configuración de los elementos del armario de control electrohusillo.....	65
Ilustración 2.46 Estructura del armario de control electrohusillo .....	65
Ilustración 2.47 Montaje real del prototipo.....	66
Ilustración 2.48 Orientación inicial de los planos Robot/Mesa.....	67
Ilustración 2.49 Calibración eje "XY" en torno a "Z" .....	68
Ilustración 2.50 Calibración eje "X" en torno a "Y" .....	68
Ilustración 2.51 Calibración eje "Y" en torno a "X" .....	69
Ilustración 2.52 Wobj de la mesa .....	70

Ilustración 2.53 Esquema plano calibrado/reloj comparador .....	70
Ilustración 2.54 Posición del eje Z del TCP husillo respecto al eje Z de la mesa .....	71
Ilustración 2.55 Altura plano XY husillo respecto al XY mesa .....	72
Ilustración 3.56 Lectura de encoders robot y espectro de frecuencias error en trayectoria. ....	74
Ilustración 3.57 Diseño CAD de la pieza de pruebas .....	74
Ilustración 3.58 Posicionado del material en la mordaza. ....	75
Ilustración 3.59 Estrategia de contorneado en una trayectoria. ....	76
Ilustración 3.60 Simulación de la estrategia .....	76
Ilustración 3.61 Estrategia de contorneado en cuatro trayectorias.....	77
Ilustración 3.62 Simulación de la estrategia. ....	77
Ilustración 3.63 Simulación del método 1.....	78
Ilustración 3.64 Simulación del método 2.....	78
Ilustración 3.65 Simulación del método 3.....	79
Ilustración 3.66 Posicionado de la mordaza y pieza.....	79
Ilustración 3.67 Pieza método 1. ....	80
Ilustración 3.68 Pieza método 2. ....	80
Ilustración 3.69 Pieza del método 3, Move C. ....	80
Ilustración 3.70 Pieza método 3, Move L Z fine.....	80
Ilustración 3.71 Selección de la operación de ensayo.....	82
Ilustración 3.72 Trayectoria programada y distancia entre puntos de trayectoria.....	82
Ilustración 3.73 Mecanizado de la ranura.....	83
Ilustración 3.74 Representación de los tipos de amortiguamientos.....	84
Ilustración 3.75 FRF medidas para dos configuración 6660. ....	85
Ilustración 3.76 Probetas mecanizadas en Aluminio y PUR.....	88
Ilustración 3.77 Vista isométrica superponiendo mediciones en Aluminio y PUR. ....	89
Ilustración 3.78 Vista lateral superponiendo mediciones en Aluminio y PUR.....	89
Ilustración 3.79 Vista frontal superponiendo mediciones en Aluminio y PUR. ....	89

Ilustración 3.80 Vista superior superponiendo mediciones en Aluminio y PUR.....	90
Ilustración 3.81 Vista superior ampliada superponiendo en Aluminio y PUR. ....	90
Ilustración 3.82 Esfuerzos y potencia consumida en Aluminio. ....	90
Ilustración 3.83 Aceleraciones registradas en Aluminio. ....	91
Ilustración 3.84 Aceleraciones registradas en Aluminio entrada herramienta. ....	91
Ilustración 3.85 FFT en RMS en Aluminio. ....	91
Ilustración 3.86 FFT en PEAK en Aluminio. ....	91
Ilustración 3.87 Esfuerzos y potencia consumida en PUR. ....	92
Ilustración 3.88 Aceleraciones registradas en PUR. ....	92
Ilustración 3.89 Aceleraciones registradas en PUR entrada herramienta. ....	92
Ilustración 3.90 FFT en RMS en PUR. ....	92
Ilustración 3.91 FFT en PEAK en PUR. ....	93
Ilustración 3.92 Posiciones y trayectorias de corte.....	95
Ilustración 3.93 Orientación del vector fuerza. ....	95
Ilustración 3.94 Ejecución de las pruebas de mecanizado. ....	95
Ilustración 3.95 Programación y Simulación de las trayectorias en MASTERCAM.....	98
Ilustración 3.96 Pruebas realizadas con el cabezal de mecanizado orientado a 0°, 45° y 90° ...	99
Ilustración 3.97 Pruebas realizadas variando la velocidad de avance y rotación.....	99

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1.1.Productos y operaciones de mecanizado empleadas en diferentes sectores. ....	20
Tabla 1.2 Barreras tecnicas según el componente del sistema .....	32
Tabla 1.3 Robots desarrollados por los principales fabricantes .....	34
Tabla 2.4 Características físicas de la célula de carga.....	51
Tabla 2.5 Resultados de las orientaciones en torno al eje "Y" .....	69
Tabla 2.6 Resultados de las orientaciones en torno al eje "X" .....	69
Tabla 2.7 Desviaciones del eje "X".....	71
Tabla 2.8 Desviaciones en el eje "Y" .....	71
Tabla 3.9 Definición del TPC.....	73
Tabla 3.10 Cargas e inercias del cabezal de mecanizado. ....	73
Tabla 3.11 Posición del WOBJ mesa. ....	73
Tabla 3.12 Propiedades físicas del PUR. ....	75
Tabla 3.13 Herramientas de Corte. ....	75
Tabla 3.14 Resultados dimensionales en milímetros. ....	80
Tabla 3.15 Ejemplo de datos de las mediciones. ....	83
Tabla 3.16 Ejemplo de cálculo. ....	84
Tabla 3.17 Frecuencias propias de vibración para una configuración de robot. ....	85
Tabla 3.18 Comparativa entre valores simulados y medidos. ....	86
Tabla 3.19 Propiedades físicas del Aluminio 5083.....	87
Tabla 3.20 Herramienta de fresado.....	87
Tabla 3.21 Estudio factorial de Variables.....	88
Tabla 3.22 Estudio factorial de Variables.....	94
Tabla 3.23 Ensayos Realizados.....	94
Tabla 3.24 Medidas Precisión de los ensayos. ....	96



# ABREVIATURAS

---

TCP	Tool Center Point
WOBJ	Work object
MOVE J	Movimiento libre punto a punto
MOVE L	Movimiento lineal
MOVE C	Movimiento Circular
PUR	Espuma rígida de poliuretano
FRF	Función de Respuesta en frecuencia
FFT	Transformada rápida de fourier

---

# I. INTRODUCCIÓN

A nivel industrial ha existido, y existe, la tendencia a aplicar de manera directa la filosofía convencional del mecanizado a los sistemas robotizados. Utilizando este planteamiento muchos han fracasado en el intento, pues la sustancial diferencia entre ambos sistemas de fabricación aconsejan un estudio previo que oriente la resolución de cada aplicación particular. Los conocimientos sobre robótica y tecnología de mecanizado deben ser adecuadamente conjugados para obtener un éxito aceptable.

En este sentido, se debe resaltar la ardua labor de aprendizaje a la que se ven sometidos los operadores de celdas robotizadas, previamente acostumbrados a utilizar centros de mecanizado, por carecer de métodos y procedimientos que recomienden unas pautas de trabajo preferentes, frente a otras menos recomendables, que permitan producir piezas dentro de un rango de tolerancia de fabricación y calidad superficial aceptables.

La carencia de reglas que guíen a los usuarios de celdas robotizadas en el mecanizado supone un mayor grado de incertidumbre sobre el posible resultado del proceso de conformado, quedando supeditada la selección de estrategias y condiciones de corte a la intuición del operador, o al nefasto proceso de prueba y error.

La desviación y vibración de la herramienta durante la trayectoria de trabajo dependen fundamentalmente de la rigidez del robot, la magnitud de las fuerzas de corte y la dirección de acción predominante, y aunque algunos autores han investigado o están investigando en este área conocimiento, todavía no se ha resuelto es problemática con una orientación orientada a taller.

La baja rigidez de los robots antropomórficos no ha sido una barrera técnica especialmente limitante en el desarrollo de soluciones industriales destinadas a resolver aplicaciones de manipulación, soldadura, ensamblaje de componentes, u otro tipo de operaciones donde las fuerza exteriores al sistema se deben mayoritariamente a las aceleraciones del propio robot y a efectos gravitacionales. Esta problemática ha sido ampliamente abordada por la comunidad científica y resuelta de manera satisfactoria. Sin embargo, en aquellas aplicaciones en las que el robot se ve sometido a fuerzas periódicas características del proceso de manufactura, como es el caso de las fuerzas de mecanizado, el análisis del comportamiento mecánico no ha sido suficientemente atendido hasta el momento.

El estudio de la rigidez estructural del robot en procesos de mecanizado ha sido tímidamente abordado por algunos autores, y entre los avances más destacables debemos resaltar el desarrollo del modelo dinámico y cinemático del robot propuesto por Bauer, J<sup>1</sup>, lo que ha permitido caracterizar la elasticidad y amortiguamiento equivalente de la estructura articulada, mediante ejes virtuales referidos a un sistema de coordenadas cartesiano. Para determinar la rigidez estructural del manipulador es necesario, por tanto, identificar los parámetros del modelo mecánicos del robot y realizar varios experimentos entre los que debemos destacar el análisis modal y la medición de la rigidez robot en diferentes puntos del área de trabajo. Aplicar dicho modelo permite predecir la desviación de la trayectoria del robot bajo fuerzas externas, lo que representa una herramienta tremendamente útil para simular<sup>2</sup> el comportamiento del robot en diferentes condiciones de conformado y estimar errores de precisión en trayectoria.

---

<sup>1</sup> Bauer, J. et al; "Analysis of Industrial Robot Structure and Milling Process Interaction for Path Manipulation"; Process Machine Interactions, Springer; 2011

<sup>2</sup> Höppler, R.; "A unifying object-oriented methodology to consolidate multibody dynamics computations in robot control"; PhD Thesis TU Darmstadt; 2004

Para establecer los esfuerzos del proceso de conformado sobre el TCP del robot nos basaremos en el modelo de Altintas<sup>3</sup>. Este modelo consiste en discretizar la altura de la fresa en discos de espesor infinitesimal y establecer las fuerzas en dirección radial, tangencial y axial al filo de corte. La suma de las fuerzas que actúan sobre cada elemento infinitesimal determinan la resultante de los esfuerzos de corte en función del giro de la herramienta.

La otra barrera técnica que obstaculiza la incorporación del robot en el proceso de mecanizado es la vibración. A pesar de ser una materia extensamente investigada, centrada especialmente en el análisis de máquinas de mecanizado convencionales o CNC, el mecanismo de vibración en el proceso de mecanizado robotizado tampoco ha sido adecuadamente atendido. Es posible reconocer modestos avances en este sentido, como son las aportaciones de Pan<sup>4</sup> en cuanto a criterios de estabilidad y pautas para evitar la vibración durante el proceso.

Para abordar el estudio de los efectos vibratorios hemos tenido en cuenta a Tobias<sup>5</sup> y Tlusty<sup>6</sup>, quienes reconocieron que las causas de mayor peso en la aparición de vibraciones y la auto-excitación de la herramienta son el acoplamiento de los modos de frecuencia y el chatter regenerativo. El acoplamiento de los modos de vibración se deben al hecho de que la masa del sistema vibra simultáneamente en las direcciones de los grados de libertad del sistema, con diferentes amplitudes y con una diferencia de fases. La vibración regenerativa se basa en el hecho de que el filo de la herramienta corta una superficie cuya geometría resulta del corte filo precedente, por lo que la profundidad y la fuerza de corte varían.

Según Altintas el chatter regenerativo sucede antes que la vibración por acoplamiento de modos del frecuencia en la mayoría de los procesos de mecanizado. Siendo el robot un sistema de fabricación con rigidez estructural y precisión de movimientos considerablemente inferior a otros sistemas productivos, es previsible que la franja que limita la aparición de dichos efectos sea mucho más estrecha que en el caso de centros de mecanizado convencional, y por tanto la elección de óptimas condiciones de corte adquiere mayor relevancia.

## II. OBJETIVOS, ALCANCE E INNOVACIONES

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal el "**Desarrollo de una metodología predictiva de precisión y acabado superficial aplicado al mecanizado robotizado**" que permite pronosticar el resultado del proceso de conformado mediante robot antropomórficos, y por tanto actuar sobre aquellos factores me permitan mejorarlos.

Del planteamiento realizado se extrae que estas mejoras son posibles de alcanzar mediante la correcta utilización del robot y la adecuada selección de condiciones de corte, pues la desviación y vibración de la herramienta durante la trayectoria de trabajo dependen fundamentalmente de la rigidez del robot, la magnitud de las fuerzas de corte y la dirección de acción predominante.

Por tanto, esta investigación tiene por finalidad dotar al usuario de herramienta para una mejor utilización de la rigidez del robot durante el proceso de conformado, y estableciendo

---

<sup>3</sup> Altintas, Y.; "Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations and CNC Design"; Cambridge University Press; 2000

<sup>4</sup> Pan, Z. et al; "Chatter analysis of robotic machining process"; Journal of Materials Processing Technology, Vol.173, pp.301-309; 2006

<sup>5</sup> Tobias, S., & Fishwick, W; "The chatter of lath tools under orthogonal cutting conditions"; The Transaction of the ASME, No. 80, pp. 1079-1088; 1958

<sup>6</sup> Tlusty, J. & Polacek, M.; "The stability of machine tools against self excited vibrations in machining"; International Research in Production Engineering, ASME, pp. 465-474; 1963

condiciones de corte más favorables mediante un adecuada orientación de las trayectoria de corte, ubicación apropiada de la pieza de trabajo y optimización de los parámetros de corte, para de esta manera obtener una mejor precisión y acabado superficial. Los desarrollos teórico-experimentales han permitido validar técnicas y procedimientos que debidamente conjugados sirven para establecer convenientes estrategias de fabricación de aplicación en el mecanizado robotizado.

El desarrollo de esta nueva metodologías representa la principal novedad científica de la investigación, y para alcanzar dicho fin ha sido necesaria la consecución de los siguientes objetivos parciales:

1. **Desarrollo de un modelo teórico reducido que relaciona la interacción entre la mecánica del robot y las fuerzas del proceso de corte:** Este modelo es una de las novedades científica más destacables de la investigación, pues representa la formulación de un modelo que relaciones las fuerzas de corte, con el comportamiento mecánico del robot, tanto en términos de rigidez como a nivel dinámico o comportamiento. Este modelo permite predecir la desviación de trayectoria prevista y el grado de calidad superficial que se podrían alcanzar en determinadas condiciones de corte. También contribuye a establecer los principales parámetros y variables del proceso de mecanizado robotizado que posteriormente será estudiados en profundidad.
2. **Se establecen procedimientos necesarios para caracterizar el modelo de interacción entre la mecánica del robot y las fuerzas de corte** adaptado a la peculiaridades de la celda experimental que la que se validará. Se establece un procedimiento para determinación de las matrices de rigidez y amortiguación de puntual referida a un sistemas de coordenadas cartesiano ubicado en el TCP del robot. También se describen los métodos de sensorización de esfuerzos y vibración del robot, indicando los medios de monitorización.
3. **La optimización experimental de los parámetros del proceso**, en base al modelo de interacción entre la mecánica del robot y las fuerzas de proceso, es formulada para mejora la precisión y calidad superficial del mecanizado robotizado: la rigidez-amortiguación del robot (Mapa de valores caracterizados para el espacio de trabajo) y las fuerzas de corte son las principales variables a estudiar, por lo que se plantea, análisis de configuración de ejes robot más ventajosas (fuerzas y orientaciones), análisis de la mejor ubicación de la pieza y estudio de las condiciones de corte más adecuadas para mejor aprovechamiento del sistema robotizado, etc.
4. **Se desarrolla la nueva metodología predictiva de aplicación al mecanizado robotizado:** los desarrollos teórico, a validar experimentalmente en el capítulo III, permiten disponer de técnicas y procedimientos que debidamente conjugados sirven para caracterizar celdas con robots antropomórficos de diversas cinemáticas y establecer nuevas estrategias de mecanizado robotizado. Esta metodología enuncia reglas y procedimientos que permiten optimizar el uso del robot antropomórficos para aplicaciones de mecanizado mediante la selección de condiciones de corte más adecuadas, la mejor utilización de la rigidez del robot para procesos de conformado por arranque de material, mejor orientación de las trayectoria de corte, ubicación más apropiada de la pieza de trabajo, etc.

### III. ESQUEMA ORGANIZATIVO DE LA TESIS

A continuación se realiza una breve descripción de la organización de los contenidos a que se exponen en el actual documento de tesis doctoral:

- Parágrafos I, II, III: Caracterización del problema.
- Capítulo I: Análisis del estado del arte de sistemas y técnicas mecanizado robotizado
- Capítulo II: Desarrollo de una metodología predictiva de aplicación al mecanizado robotizado.
- Capítulo III: Validación de la metodología desarrollada.
- Capítulo IV: Aportaciones y líneas futuras de trabajo.
- Capítulo V: Bibliografía básica.

Se recopila la información sobre el proceso de mecanizado robotizado actual, se estudian las limitaciones de las celdas robotizadas y se identifican los principales condicionantes. A priori el estudio del arte sobre sistemas y técnicas de mecanizado robotizado aborda el análisis de las materias relativas a las necesidades identificadas en el planteamiento del proyecto de tesis:

1. Modelos de la mecánica de los sistemas robotizados de mecanizado y fuerzas de corte.
2. La monitorización de los esfuerzos de corte durante el mecanizado.
3. El modelo de interacción entre los esfuerzos de corte y mecánica del robot.
4. Precisión, calidad superficial y vibración de la herramienta en el mecanizado robotizado.

Luego se plantean los desarrollos teórico-experimentales, especificando los métodos, modelos y procedimientos en los que se apoya la nueva metodología de mecanizado robotizado, justificando debidamente su necesidad y adecuación al marco de investigación propuesto.

En base a los métodos, modelos y procedimientos identificados se realiza la caracterización de la celda experimental, sistema robotizado de mecanizado en el que se lleva a cabo la experimentación, se describen los componentes que la integran y se justificará su funcionalidad en el marco de la investigación.

Se muestran los resultados de los ensayos experimentales y se validan los métodos desarrollados de aplicación al mecanizado robotizado. Se presentan las principales conclusiones de la investigación, y las líneas abiertas para su continuación futura.

# CAPÍTULO I: ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE DE SISTEMAS Y TÉCNICAS MECANIZADO ROBOTIZADO

---

## 1. Introducción al mecanizado robotizado

La evolución de la tecnología de fabricación flexible está produciendo cambios sustanciales en la forma de concebir los sistemas de producción y representa, sin lugar a dudas, la prosperidad de la industria manufactura mundial. Entre los potenciales beneficios que reporta el desarrollo de novedosos sistemas de manufactura flexible podemos destacar los siguientes:

- Reducción de los costes de operación. Se pueden reducir los costes directos y gastos generales, lo que proporciona una drástica diferencia en la competitividad.
- Mejora de la calidad del producto. Se produce una gran calidad en los productos fabricados en relación con los productos fabricados manualmente, ya que no hay riesgo de cansancio, distracción ni dependencia de la cualificación del personal. Además, se consigue una alta repetibilidad que proporciona una calidad homogénea y la reducción del índice de rechazos.
- Aumento de las tasas de producción. Se consiguen velocidades de proceso mucho mayores que las manuales. Además, los altos niveles de producción pueden permitir disminuir los plazos de entrega.
- Aumento de la flexibilidad de fabricación del producto. Los robots pueden proporcionar flexibilidad a la producción de la línea. Una vez que los procesos se programan en el control del robot, se puede cambiar fácilmente de un proceso a otro.
- Reducción del desperdicio de material y aumento del rendimiento. Se consigue mejorar la calidad de los acabados, lo cual reduce significativamente los rechazos generados por problemas de calidad.
- Mejora de la seguridad y salud en el lugar de trabajo. Los robots pueden hacerse cargo de tareas desagradables, penosas o peligrosas para la salud, disminuyendo la probabilidad de accidentes causados por el implicación de los operarios en procesos potencialmente peligrosos.

Hoy en día, en un ambiente industrial tan cambiante y con la reducción cada vez más acusada de la vida del producto, se hace patente la necesidad de producir bienes y servicios de alto valor añadido utilizando medios productivos versátiles y económicos.

Los sistemas de fabricación flexible basados en robótica industrial representan una oportunidad irrenunciable para resolver operaciones de conformado por arranque de material<sup>7</sup>. Su campo de aplicación se centra fundamentalmente en automatizar procesos de manufactura ejecutados tradicionalmente de manera manual, así como ofrecer soluciones más económicas que lleven a cabo operaciones de fabricación que actualmente se realizan en máquinas que exceden las exigencias requeridas. En este sentido se debe destacar que los robots

---

<sup>7</sup> González R., Iglesias I., et al; "Mecanizado De Materiales Blandos con un Sistema Robotizado";10º Congreso Interamericano de computación aplicada a la industria de procesos (CAIP'2011), Girona-España. Vol. 1, page 87, ISBN: 978-8484583554.

industriales ofrecen una alternativa más económica y versátil frente a los equipos CNC en aplicaciones de corte, fresado, lijado, desbaste, etc.

El mundo de la robótica no es ajena a los cambios que se están produciendo en el sector manufacturero gracias al empleo de soluciones robotizadas destinadas a solucionar operaciones de conformado por arranque de material. Tanto es así que el sector dedica gran esfuerzo en divulgar a través de revistas y publicaciones una amplia revisión de las aplicaciones que se están resolviendo actualmente mediante el uso de robots en los diferentes entornos industriales, y especialmente en lo que se refiere a operaciones de mecanizado.

Prueba de ello es el informe *Robotic Machining White Paper Project*<sup>8</sup> publicado en el año 2008, en cuya elaboración han participado los principales fabricantes de robots (ABB, FANUC, KMT, KUKA, MOTOMAN, etc.), y en la cual se pone de manifiesto la proliferación de celdas robotizadas para realizar diferentes operaciones de mecanizados. De esta revisión, se extrae el mapa representativo de la relación existente entre los productos finales y las operaciones de mecanizado empleadas en diferentes sectores industriales en los que se están aplicando esta clase de sistemas productivos:

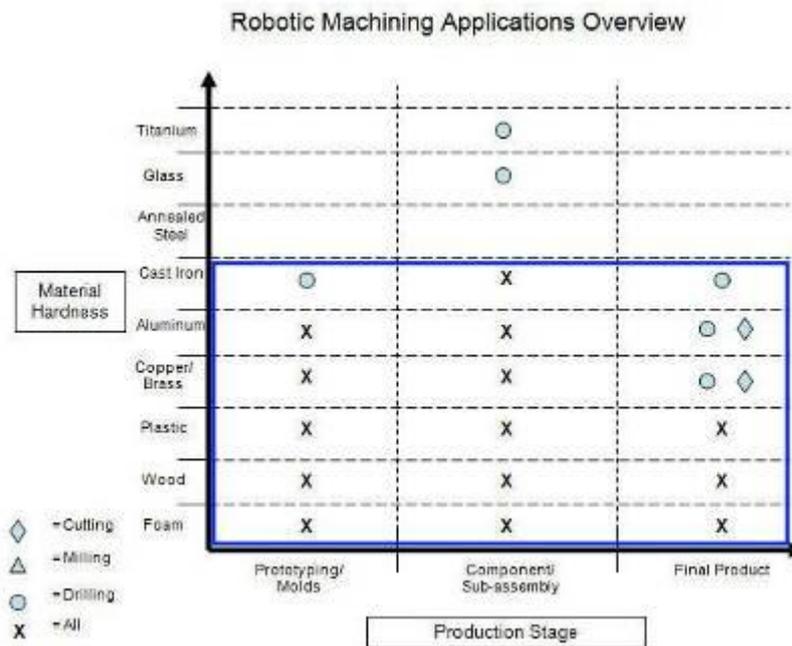
SECTOR	OPERACION	PRODUCTO
Todos los sectores	Fresado ( <i>milling</i> )	Prototipos
Aeroespacial	Amolado, pulido, perforado, corte	Segmentos de alas, aislantes, particiones interiores, álabes
Automóvil	Desbastado, desbarbado, pulido, perforado, corte	Motores, paneles de carrocería, mandos apertura, parachoques, arena para machos, prensa embutición.
Moda	Esmerilado ( <i>sanding</i> ), fresado	Moldes maniquí, maniquí
Fundición	Desbarbado, fresado, perforado, ranurado, acabado	Moldes, funciones
Naval	Amolado	Cascos barco
Médico	Amolado, pulido	Prótesis
Entretenimiento	fresado	Decorado
Plásticos	Ranurado, fresado	Moldes, cascos
Maderero	Ranurado, fresado	Moldes bañera, muebles, pasamanos, terrajas

**Tabla 1.1. Productos y operaciones de mecanizado empleadas en diferentes sectores.**

En dicho documento tanto los fabricantes como los usuarios de dichas instalaciones coinciden en destacar que el mayor condicionante para resolver operaciones de mecanizado utilizando robots industriales es la dureza de los materiales a procesar. En la actualidad a penas se detectan problemas en la ejecución de operaciones de conformado por arranque de material cuando estos presentan una baja dureza (espuma, madera, plástico, etc) con

<sup>8</sup> DePree, J. y Gesswein, C.; "Robotic machining White paper Project"; Halcyon Development; 2008

independencia de la etapa de manufactura; prototipo, producto intermedio o producto final. Pero las limitaciones de los sistemas robotizados se ponen de manifiesto cuan mayor sea la dureza del material a trabajar, como es el caso de algunas aleaciones de aluminio, cobre, bronce y fundición de hierro. Por lo tanto, la posible utilización de sistemas robotizados para resolver operaciones de mecanizado está condicionada fundamentalmente de las exigencias del proceso de conformado.



**Ilustración 1.1 Perspectiva de aplicación de robots para operaciones de mecanizado en diferentes materiales y etapas de la fabricación**

La principal dificultad a la que se enfrentan los ingenieros, cuando se plantean resolver operaciones de mecanizado aplicando robots articulados, es la carencia de fundamentos o recomendaciones técnicas que les permitan diseñar nuevos sistemas de fabricación que respondan adecuadamente a las exigencias del proceso. Para abordar dicho reto es necesario combinar conocimientos y experiencia en la materia, aunque en muchos casos no son suficientes para lograr el resultado deseado, pues la celda robotizada de mecanizado combina diversas tecnologías y lleva intrínsecamente asociadas las propias limitaciones de cada una de ellas. Para analizar adecuadamente la problemática implícita al desarrollo de estos sistemas de manufactura, es aconsejable estudiar tanto las limitaciones del Robot, que incluye el conjunto mecánico hasta la herramienta, como la selección de las adecuadas condiciones de corte y estrategias de desbaste.

La configuración característica de la celda robotizada de mecanizado, y por ello objeto de análisis en la presente propuesta de investigación, es aquella en la que se combina un robot articulado, un cabezal de mecanizado y diversos elementos de sensorización que asisten al proceso de conformado. Para facilitar la comprensión de la problemática que nos ocupa, expondremos las principales barreras técnicas detectadas en las celdas robotizadas destinadas a resolver operaciones de mecanizado, prestando especial atención a las limitaciones de los elementos que las integran.

**La principal problemática que presenta el robot antropomórfico es su baja rigidez o elevada elasticidad,** y como hemos comentado, reduce su aplicación en operaciones de

mecanizado sobre materiales que presentan relativa dureza (aluminio, bronce, cobre, etc). La rigidez del robot viene determinada fundamentalmente por los elementos mecánicos de la cadena cinemática, es decir, la rigidez equivalente a la rigidez de las barras y engranajes que lo integran. Cuando los esfuerzos de conformado son altos, su rigidez no es suficiente para garantizar la precisión de trayectoria requerida, a consecuencia de la flexión del brazo robot. También es necesario destacar la presencia de fenómenos resonantes bajo la acción de fuerzas de corte variables, lo que implica errores en la trayectoria de la herramienta y en la calidad superficial de la pieza.

**La segunda limitación importante que presenta el robot antropomórfico es la precisión.** El error de precisión de los robots antropomórficos viene determinado principalmente por los elementos mecánicos, y los factores que contribuyen en mayor medida a dicho efecto son; el juego de motores y engranajes, la rigidez de las barras del manipulador y la resolución de los motores paso a paso. Otro factor que determina la precisión del robot, aunque en menor medida, es la transferencia del objetivo teórico (puntos de trayectoria), cuyo efecto se puede minimizar optimizando datos y parámetros en el sistema de control del robot. La resolución de los elementos de control es intrínseca al robot, similar para las diferentes marcas y fácilmente modificable.

**Se debe distinguir entre parámetros de precisión o repetibilidad de pose frente a trayectoria.** En el primer caso los valores se aproximan a la décima de milímetro, mientras que en el segundo caso dicha magnitud es muy superior y ronda aproximadamente el milímetro. El error en punto es inferior ya que el robot puede ser forzado a alcanzar e incluso parar en el objetivo (punto de trayectoria), mientras que en el recorrido entre dos puntos de trayectoria tiene unas desviaciones superiores.

**Los robots antropomórficos presentan** una estructura cinemática totalmente diferente a los sistemas cartesianos. La combinación de los 6 ejes de libertad le confiere una gran capacidad de reorientación entorno al TCP (Punto central de la herramienta). Por contra, surgen una serie de dificultades para garantizar la generación de trayectorias de trabajo carentes de **singularidades, indeterminaciones, colisiones, límites de giro de ejes y resolución espacial.**

Tradicionalmente la programación de trayectorias en robot se realiza mediante "Teaching", programación manual de puntos de la ruta. Este método es adecuado para resolver la mayoría de operaciones de paletizado, manipulación, ensamblado, soldadura, etc, donde la disponibilidad de referencias geométricas para configurar la ruta a seguir simplifica la tarea, pero es muy poco aplicable en el caso del mecanizado, donde la geometría de la pieza requiere de un conjunto de trayectorias más complejo. La aplicación de **sistemas de manufactura asistida por ordenador (CAM)** ha permitido superar las dificultades relativas a la **programación automática de trayectorias.** Sin embargo, el desarrollo de herramientas de simulación que permita analizar los movimientos de robot durante la operación de mecanizado para garantizar el alcance de la herramienta a la zona de trabajo (problemas de reorientación de cabezal, superar límite recorrido en ejes, etc), evitar colisiones con la pieza y detección de singularidades, entre otros, han supuesto una barrera técnica importante pero que en la actualidad no representa una limitación. Hoy en día **se dispone potentes herramientas CAM y simuladores de trayectoria que garantiza la consecución de las rutas programadas** con una efectividad superior al 99%.

**La problemática relativa a las herramientas de mecanizado es** similar a la existente en las máquinas CNC, como es el caso de **la vibración, el tintineo, el desgaste y la refrigeración,** aunque los dos primeros efectos adquieren mayor importancia en las celdas robotizadas, debido fundamentalmente a la menor rigidez del robot. El desgaste de la

herramienta es un parámetro ampliamente estudiado a nivel científico, y a nivel industrial presenta una serie de problemas y costes asociados importantes. Sin embargo, no es una variable significativa en el mecanizado robotizado, pues aunque los niveles de desbaste de la herramienta sean similares a los obtenidos en una máquina herramienta, el efecto de este fenómeno tiene un incidencia sobre la precisión de la pieza final despreciable frente al error de trayectoria de trabajo. Esto mismo ocurre con la refrigeración de la herramienta, y por tanto, ambos fenómenos y sus efectos sobre la precisión no serán abordados en esta investigación.

En la actualidad tan solo un pequeño porcentaje de los productos mecanizados están fabricados bajo sistemas de celdas robotizadas. Sin embargo muchos ven en esta, una aplicación con potencial de crecimiento en los próximos años, pero se requiere un esfuerzo significativo para mostrar a los usuarios finales las capacidades de mecanizado robotizado, así como la posible reducción en costes de inversión y el aumento de flexibilidad de fabricación, lo que supone incremento de la competitividad.

No obstante, una de las principales barreras de las CELDA DE MECANIZADO ROBOTIZADO es la falta de rigidez respecto a los centros de mecanizado CNC, lo que conlleva una limitación en cuanto a los posibles materiales a procesar, presentando graves problemas de precisión y calidad superficial a medida que aumenta la dureza del material a procesar. Por tal motivo se han realizado acciones de vigencia tecnológica sobre el estado actual de la robótica en la industria, prestando especial atención a los sectores del mecanizado, identificando las principales limitaciones y barreras que se plantean, así como anunciar las tendencias futuras.

En este caso se clasifican las aplicaciones de mecanizado evaluadas según la dureza del material. Este análisis permite fomentar el conocimiento sobre las oportunidades potenciales que ofrecen los sistemas robotizados y su posible campo de aplicación.

## **2. Estado del arte de mecanizado robotizado e industria**

Las acciones de vigencia tecnológica fueron encaminadas a establecer la situación actual del mecanizado de materiales blandos mediante celdas robotizadas, y se centraron en consultar diferentes fuentes bibliográficas y analizar publicaciones científicas, tesis doctorales, patentes, bases de datos y artículos.

Las estrategias de búsqueda empleadas se sustentan en las siguientes palabras clave: Milling, grinding, polishing, Stiffness, Chatter, Vibration, Robotic, Damping, etc.

### **2.1. Aplicaciones en materiales plásticos**

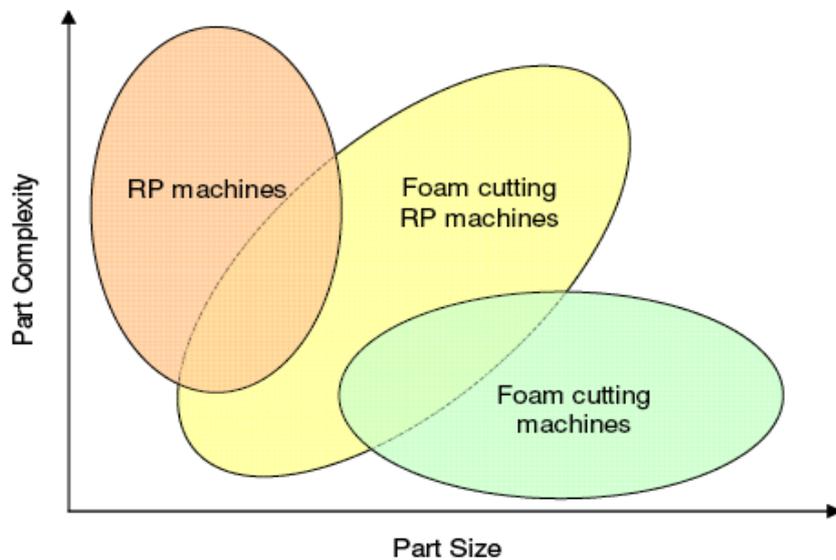
En los últimos años ha surgido una nueva familia de máquinas altamente innovadoras que permite obtener un prototipo de un modelo o de un molde de manera precisa y rápida. Estas máquinas conocidas como máquinas de Prototipado Rápido (RP), permiten obtener piezas físicas acabadas de modo automático, con diversidad de formas y dimensiones, con complejidad elevada y difícilmente obtenibles en máquinas convencionales, o que requerirían una ejecución larga y compleja en centros de mecanizado con CN.

Los avances en equipos de prototipado rápido se dirigen hacia el aumento de la velocidad y precisión, sin embargo los equipos tradicionales de RP no son idóneos cuando se pretende mecanizar volúmenes de espuma de más de 0,5 m<sup>3</sup>, debido a las limitaciones de tamaño, coste y tiempo. Por tanto existe un elevado interés por parte de grupos de

investigación de todo el mundo en desarrollar tecnologías de fabricación y prototipado rápido capaces de producir piezas grandes de una manera efectiva directamente desde archivos CAD, como es el caso del corte de espuma por prototipado rápido (*Foam cutting rapid prototyping*).

A partir del modelo sólido de la pieza, y por medio de un software CAD/CAM, se generan una serie de trayectorias "entendibles" por los robots antropomórficos de mecanizado. A este se le acopla una herramienta de mecanizado tradicional, que siguiendo las trayectorias mencionadas, con una precisión de décimas de mm, desbasta el material hasta conseguir la pieza deseada. Tales máquinas posibilitan una mayor velocidad y menor coste en la obtención de prototipos comparados con los procesos tradicionales de fabricación RP, permitiendo por ejemplo la obtención de matrices o modelos preliminares destinados a pre-series de fabricación. Estos sistemas son ideales para la producción de lotes piloto, permitiendo el desarrollo de productos en menor tiempo y coste.

Uno de los materiales blandos más comúnmente empleados en RP son las espumas de poliestireno en sus dos formas básicas, poliestireno extruido y poliestireno expandido. Así en el artículo "**A review of state-of-the-art large sized foam cutting rapid prototyping and manufacturing technologies**"<sup>9</sup> realizado por la Universidad de Canterbury (Nueva Zelanda) en 2010, se hace una revisión de los principales desarrollos en la tecnología de corte de la espuma de poliestireno por prototipado rápido como se ve en la siguiente figura.



**Ilustración 1.2 Comparación entre complejidad y tamaño de la pieza**

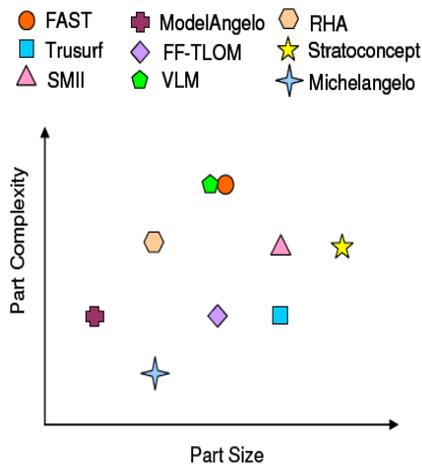
Los nueve sistemas que describe la mencionada revisión tienen en común las siguientes características:

- El proceso de mecanizado se realiza sobre espumas de poliuretano
- La estrategia de mecanizado y trayectoria se determina directamente desde una representación digital 3D del prototipo.
- El sistema es capaz de reproducir formas complejas y libres.

<sup>9</sup>Hadley Brooks; A review of state-of-the-art large sized foam cutting rapid prototyping and manufacturing Technologies; Universidad de Canterbury; Nueva Zelanda; 2010.

- Cuentan con un interfaz hombre-máquina que permite una transmisión eficiente de la información entre el operario y el equipo.

En cambio, las principales diferencias en los sistemas se muestran en las dos siguientes figuras:



**Ilustración 1.3 Comparación cualitativa de los 9 sistemas respecto al tamaño y complejidad**

System	Property		
	Cutting Tool	Build Strategy	Build Speed
FAST	Hot-ribbon	Direct sculpting	0
Trusurf	Water jet	Layer based	0
SM II	Hot-wire	Layer based	0
ModelAngelo	Hot-wire	Direct sculpting	- -
FF-TLOM	Hot-ribbon	Layer based	DATUM
VLM	Hot-wire	Layer based	+
RHA	Hot tool	Direct sculpting	-
Stratoconcept	Hot-wire	Layer based	0
Michelangelo	Hot-wire	Direct sculpting	++

Key: 0 = Same as Datum  
 - = Less than Datum  
 + = Greater than Datum

**Ilustración 1.4 Principales características de los sistemas estudiados**

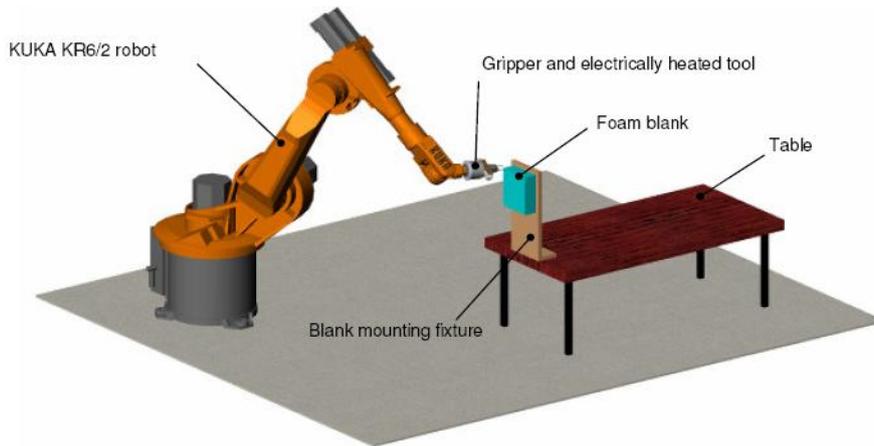
Hasta el momento, la estrategia más extendida era cortar y posteriormente ensamblar individualmente las capas (*layer based*), sin embargo los avances más recientes en el mecanizado robotizado como la escultura directa (*direct sculpting*) reduce el post-ensamblado de las capas y aumenta la complejidad del mecanizado. Además se podría contar con una mesa giratoria de 2 ejes que facilite la inclinación y rotación de la pieza de trabajo, aumentando así la flexibilidad del *direct sculpting*. Igualmente se podría combinar ambas metodologías en caso de querer fabricar piezas de tamaños muy grandes o emplear el *direct sculpting* para cortar capas individuales como lo haría un sistema *layer based*.

Esto quiere decir, que entre las técnicas de común utilización en la generación de modelos con geometrías complejas, la combinación de robots antropomórficos y ejes externo coordinados que permitan interpolar la movimientos abren un campo de aplicación enorme que debe ser explotado.

El citado artículo es un resumen del estado del arte perteneciente a la tesis presentada en 2007 por un investigador del departamento de ingeniería mecánica de la misma Universidad de Canterbury (Nueva Zelanda) "**Development of a novel robotically effected plastic foam sculpting system for rapid prototyping and manufacturing**"<sup>10</sup>.

En una segunda parte de este trabajo se detallan los resultados obtenidos del desarrollo de un sistema de corte de espuma por prototipado rápido como el de la **Ilustración 1.4 Principales características de los sistemas estudiados** en cuyas pruebas se varía la geometría del diseño a partir de un modelo sólido generado en el sistema CAD, la velocidad de corte, el tamaño de la hoja de corte, el perfil de la hoja de corte, la temperatura de la hoja y la distancia entre pasadas adyacentes.

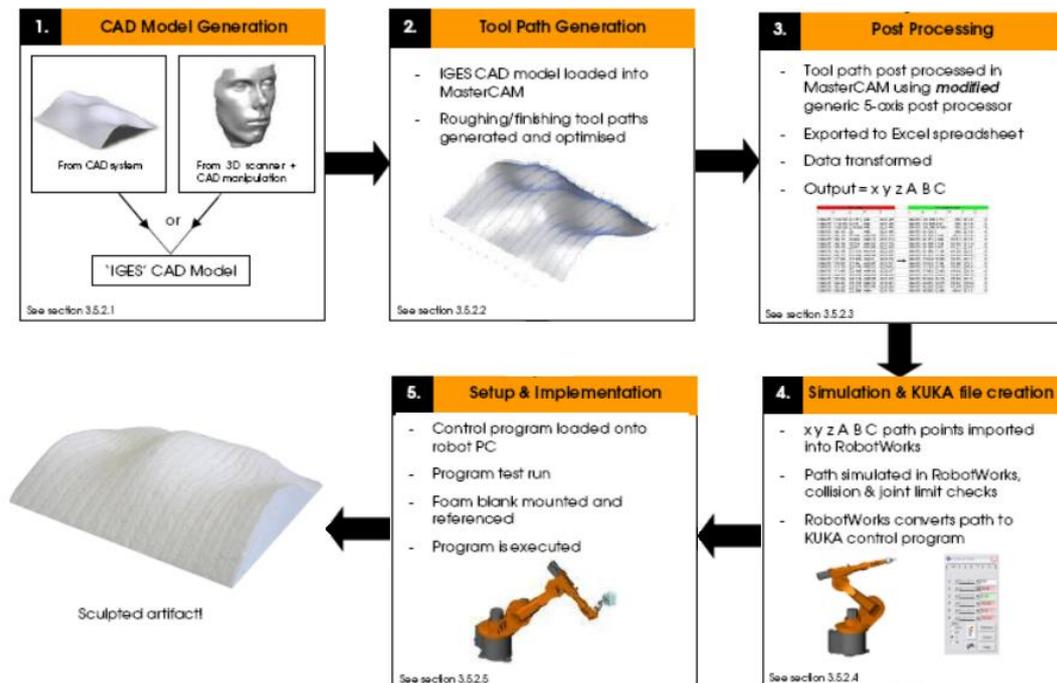
<sup>10</sup> Anton James Posthuma; Development of a novel robotically effected plastic foam sculpting system for rapid prototyping and manufacturing; Universidad de Canterbury; Nueva Zelanda; 2007.



**Ilustración 1.5 Esquema de instalación**

La secuencia de funcionamiento del sistema propuesto se resume en la **Ilustración 1.5** Esquema de instalación

1. Generación del modelo CAD
2. Generación de la trayectoria de la herramienta
3. Post-procesado de los datos
4. Conversión de los parámetros de la trayectoria al programa de KUKA
5. Carga de las instrucciones en el PC del robot
6. Ejecución del programa.

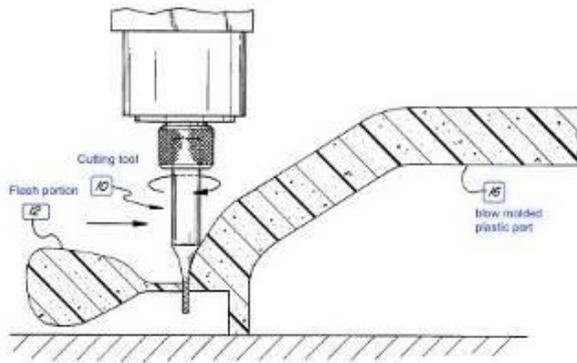


**Ilustración 1.6 Resumen del Procedimiento**

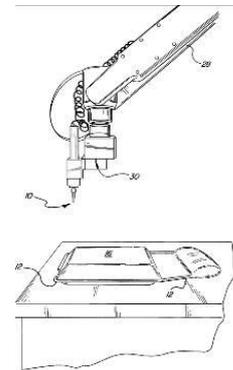
En prototipado rápido no sólo se encuentran configuraciones de celda formadas por un solo robot, también es habitual encontrar dos robots trabajando sobre una misma pieza, lo que aporta mayor flexibilidad, eficiencia y fiabilidad tal como se concluye en el artículo **“Rapid and flexible prototyping through a dual-robot workcell”**<sup>11</sup> de 2002 presentado por la Universidad del Sur de Australia, donde se presenta el desarrollo e implantación de un sistema robotizado dual para el prototipado de modelos 3D.

Lo mismo defiende el artículo presentado por la Universidad de Toronto (Canadá) en conjunto con la Universidad de Columbia (EEUU) **“A multi-arm robotic system for optimal sculpting”**<sup>12</sup> en 2008, sin embargo en este caso, uno de los robots mecaniza y el otro mueve la pieza, lo que aumenta el número de configuraciones de trabajo posibles y a su vez presenta mayores retos técnicos a resolver.

Otros ejemplos de aplicación sobre material plástico, y que difieren de la técnica de modelado o prototipado, es el desbarrado de piezas. Una de las empresas de referencia en robótica, Fanuc Robotics, presenta en la patente **“Robotic deflashing of plastics with cutter guidance”**<sup>13</sup> (US6086294) del 2000, una herramienta integral para desbastar material sobrante en piezas de plástico moldeadas por soplado tal y como se muestra en las siguientes figuras.



**Ilustración 1.7 Detalle proceso de desbarrado del material sobrante.**



**Ilustración 1.8 Herramienta montada en el brazo robotizado**

Este tipo de aplicaciones requieren habitualmente de diferentes sistemas auxiliares para garantizar la operación de corte. Un ejemplo de ello es la patente **“Compliant end effector for an industrial robot”**<sup>14</sup> (US5765975), propiedad de ABB robótica y publicada en 1998. En ella se describe el elemento final (*end-effector*), representado en **ilustración 1.8** y **ilustración 1.9**, adaptable a un brazo robotizado, para corte y desbarrado de precisión de láminas flexibles de plástico.

<sup>11</sup> Hsuan-kuan Huang; Rapid and flexible prototyping through a dual-robot workcell; Universidad del Sur de Australia; 2002.

<sup>12</sup> W.S. Owen, E.A. Croft, y B. Benhabib; A multi-arm robotic system for optimal sculpting; Universidad de Toronto y Universidad de Columbia; Canadá; 2008.

<sup>13</sup> Danchine Denis y Musumur Laxmi P.; Robotic deflashing of plastics with cutter guidance (US6086294); Fanuc Robotics North America; 2000.

<sup>14</sup> Hoffmann James A. y ST Onge Douglas L.; Compliant end effector for an industrial robot (US5765975); ABB Technology Co; 1998.

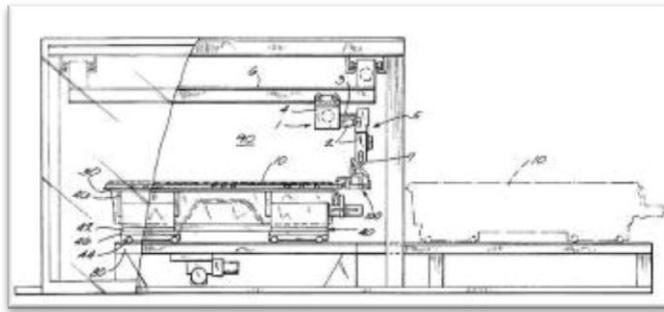


Ilustración 1.9 Cabina de mecanizado

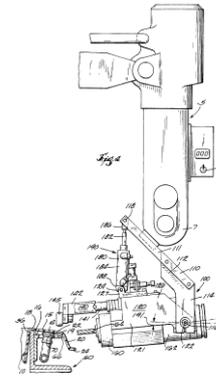


Ilustración 1.10 Detalle del end-effector

## 2.2. Aplicaciones en yeso

Una de las mejores referencia a destacar en el procesado de Yeso es el artículo **“Analysis of multi-axis milling in an anthropomorphic robot, using the design of experiments methodology”**<sup>15</sup> llevado a cabo por investigadores de la Universidad de Setubal(Portugal) y la Universidad Buckinghamshire Chilterns (Inglaterra) en 2003. Esta aportación analiza la precisión geométrica y calidad superficial obtenidas tras aplicar un proceso de fresado para fabricación de moldes y modelos de yeso empleados en el sector cerámico de las vajillas y sanitarios. Se emplea para ello un robot antropomórfico de 5 ejes, permitiendo múltiples trayectorias y minimizando el *“Gimbal lock”*. Se emplea para ello el programa Statistica V5.1, para realizar diseños experimentales y los cálculos matemáticos. En una segunda parte, se presenta el método de selección de los factores más representativos en el proceso de mecanización. Así, en relación con la rugosidad de la superficie los factores estadísticamente más significativos son el ángulo de inclinación/arrastre, velocidad de avance y la extensión del brazo. En lo que respecta a la planitud de la superficie, los factores más importantes identificados son la velocidad de avance y la extensión del brazo.

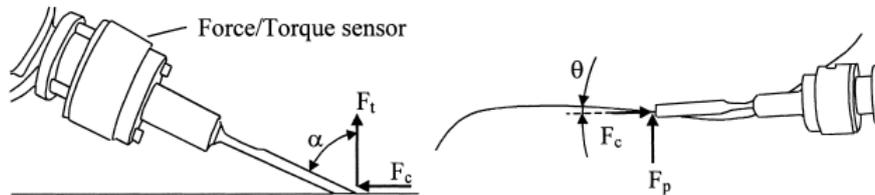
## 2.3. Aplicaciones en madera

Existen diferentes limitaciones del mecanizado en el sector maderero como las que suponen las propias características de la madera como: La humedad relativa, la clase de madera y anisotropía, influyen en las tolerancias del corte, a lo que habría que añadirle la falta de precisión inherente al robot, la desviación de la herramienta o variaciones en la programación del robot. El trabajo **“Robot control for wood carving operations”**<sup>16</sup> presentado en el 2001 por la Universidad de Linköping (Suecia), tiene como objetivo optimizar el sistema de control por sensor del vaciado de la madera, como se puede comprobar en la **Ilustración 1.10**

<sup>15</sup> J.F.C.P. Antunes Simoes, T.J. Coole, D.G. Cheshire y Antonio R. Pires; Analysis of multi-axis milling in an anthropomorphic robot, using the design of experiments methodology; Universidad Buckinghamshire Chilterns; Inglaterra; 2003.

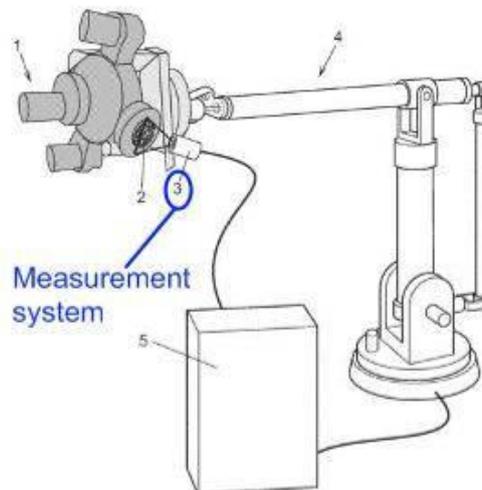
<sup>16</sup> Jan-Erik Andersson; Robot control for wood carving operations; Universidad de Linköping; Suecia; 2001.

Además de proponer un modelo de lectura capaz de minimizar el número de parámetros necesarios para programar la operación. Se propone la estructura del sistema y el algoritmo de control empleado, demostrando que es posible controlar la profundidad de corte a velocidades de la herramienta mayores de 7,5 mm/s, ajustando el ángulo de ataque para obtener una fuerza nominal.



**Ilustración 1.11 Fuerzas y geometría de la herramienta**

Otro referente importante es la patente **“A method and an apparatus for programming a material removal process carried out on an object by means of a robot”**<sup>17</sup> (WO2008113807) de 2008 llevada a cabo por la empresa ABB y mostrada en la **Ilustración 1.11 Fuerzas y geometría de la herramienta**, propone un método de mejora de la programación de un robot para un proceso de extracción de material (serrado, desbastado, taladrado) sobre diferentes materiales, siendo una de las realizaciones de la patente una ejecución sobre madera.



**Ilustración 1.12 Equipo para mecanizado de madera**

Por último, en la

**Ilustración 1.13 Furniture chattering tool unit** se muestra una visión sobre la patente **“Robotic furniture texturing”**<sup>18</sup> (US6330492) publicada en 2001 y propiedad de la empresa estadounidense Century Furniture Industries, describe un sistema robotizado programable, donde un robot multi-ejes se aplica en operaciones de texturizado de madera infringiendo

<sup>17</sup> Torgny Brogårdh; A method and an apparatus for programming a material removal process carried out on an object by means of a robot (WO2008113807); ABB Technology Co; 2008.

<sup>18</sup> Wisniewski Joseph y Jones Roger; Robotic furniture texturing (US6330492); Century Furniture Ind; 2001.

huellas de vibración (*chatter marks*), sin embargo el robot permite el intercambio de herramienta según el trabajo de texturizado deseado.

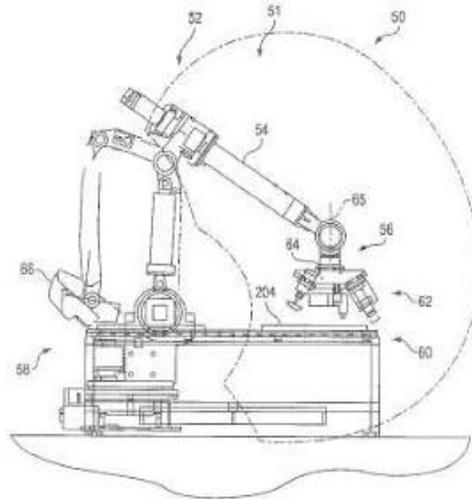


Ilustración 1.13 Furniture chattering tool unit

## 2.4. Aplicaciones en aluminio

Los robots industriales ofrecen una alternativa económica y más flexible frente a los equipos CNC en aplicaciones de preparación al mecanizado y limpieza de fundiciones de aluminio para el sector automóvil. Sin embargo la baja resistencia a la flexión de los robots ha limitado su aplicación a operaciones de mecanizado en las que se requieran baja precisión. En el artículo “**Improving machining accuracy with robot deformation compensation**”<sup>19</sup> desarrollado por el centro de investigación ABB en 2009, se presenta un método práctico para compensar la deformación del robot causada por la fuerza de mecanizado sobre aluminio. El sistema propuesto para fresado, consigue reducir el error de posición en más de un 60%, reduciéndose el error en superficie de 0,5 mm a 0,1 mm.

## 3. Análisis de la robótica actual en el mecanizado de materiales blandos

Hasta la fecha, el mecanizado robotizado ha sido aplicado en una gran variedad de segmentos industriales, utilizado en algunos procesos clave en la fabricación de un amplio espectro de productos. Una típica celda de mecanizado robotizado incorpora los siguientes componentes en un único sistema:

- Robot y controlador
- Software CAD/CAM compatible con el robot
- Electrohusillo y herramienta
- Paquete de cableado

---

<sup>19</sup> Jianjun Wang, Hui Zhang y Thomas Fuhlbrigge; Improving machining accuracy with robot deformation compensation; ABB Technology Co; 2009.

- Equipos auxiliares específicos

La dureza del material es un factor determinante para la implantación de esta tecnología e influye en los procesos en donde se emplean los robots, así como el tipo y la complejidad del producto final a fabricar. Sin embargo se está demostrando que esta tecnología está siendo implantada en una gran variedad de segmentos industriales, desde el sector aeroespacial al cinematográfico y desde el de la automoción al de la moda.

La tabla que se muestra a continuación proporciona una visión de los procesos y productos desarrollados en los distintos sectores. Algunas de las aplicaciones únicas identificadas y que son específicas para el mecanizado incluyen el fresado de moldes para la fabricación de modelos, prototipado rápido, prototipos de piezas de fundición y rebariado de bloques de motor.

SECTOR	OPERACION	PRODUCTO
Todos los sectores	Fresado ( <i>milling</i> )	Prototipos
Aeroespacial	Amolado, pulido, perforado, corte	Segmentos de alas, aislantes, particiones interiores, álabes
Automóvil	Desbastado, desbarbado, pulido, perforado, corte	Motores, paneles de carrocería, mandos apertura, parachoques, arena para machos, prensa embutición.
Moda	Esmerilado ( <i>sanding</i> ), fresado	Moldes maniquí, maniquí
Fundición	Desbarbado, fresado, perforado, ranurado, acabado	Moldes, funciones
Naval	Amolado	Cascos barco
Médico	Amolado, pulido	Prótesis
Entretenimiento	Fresado	Decorado
Plásticos	Ranurado, fresado	Moldes, cascos
Maderero	Ranurado, fresado	Moldes bañera, muebles, pasamanos, terrajas

**Tab. 1.1 Procesos y productos desarrollados en distintos sectores.**

De esta revisión se concluye que los sistemas robotizados no reemplazan a las aplicaciones de mecanizado CNC de 3-4 ejes, pero si son apropiados en procesos donde el mecanizado CNC pueden ser considerados sobrecualificados y el mecanizado robotizado se considera una alternativa viable para los materiales no metálicos y para algunos metales dependiendo del grado de dureza, del acabado superficial y de la complejidad de la pieza final.

## 4. Limitaciones actuales del mecanizado robotizado

La barrera más importante de mercado es el desconocimiento por parte de los usuarios de las capacidades y de las ventajas que tienen estos sistemas frente a los CNC ya que los potenciales usuarios tienden a ser conservadores y contribuyen a la lenta evolución tecnológica de estos sistemas de fabricación. Su pensamiento redundante en un "Todo o nada" puesto que la calidad de fabricación utilizando materiales duros como el acero o el titanio es menor que la de los sistemas CNC, razón por la que tienden a descartarlos sin tener en cuenta el mecanizado sobre materiales blandos, donde las capacidades de mecanizado son más que aceptables y con un coste que ronda entre 50-70% del coste de una máquina CNC.

En cuanto a las barreras técnicas detectadas en este estudio, se decide realizar una clasificación por componentes y limitaciones identificadas, según la siguiente tabla:

COMPONENTE DEL SISTEMA	BARRERAS TÉCNICAS
Robot	Precisión, Rigidez, Deformación Lazo abierto/Lazo cerrado Singularidad Calibración
Software	Facilidad de uso Falta de standards
Herramienta	Vibración, Chattering Refrigerante
Equipo auxiliar	La localización y orientación espacial

**Tabla 1.2 Barreras técnicas según el componente del sistema**

Basándose en la información recogida se puede constatar que una de las barreras principales es la rigidez del robot, directamente relacionada con la dureza del material a mecanizar. Dicho lo cual, los principales fabricantes de robótica han desarrollado brazos robots más rígidos y más precisos especializados en aplicaciones de mecanizado siguiendo dos enfoques: Robots antropomórficos y robots paralelos. Cada tipo de robot tiene sus ventajas y desventajas en cuanto a la rigidez y al área de trabajo. El robot antropomórfico ofrece un mayor volumen de trabajo y accesibilidad de trabajo, pero con rigidez limitada en comparación con el robot paralelo.

Por el contrario, los robots paralelos proporcionan mucha mayor rigidez, pero a un campo de trabajo reducido. La integración de los elementos auxiliares de apoyo, tales como un séptimo eje de deslizamiento lineal o unidades rotativa puede aumentar la funcionalidad de los robots antropomórficos, y la flexibilidad de la célula de trabajo a un mayor costo, siendo aun así más económicos que las máquinas CNC.

En el caso de los robots antropomórficos se debe distinguir entre repetibilidad de posición y repetibilidad de trayectoria. En el primer caso los valores se aproximan a las centésimas de milímetro, mientras que en el segundo caso dicha magnitud es muy superior y rondan las décimas de milímetro. El valor de posición es inferior ya que el robot puede ser forzado a alcanzar y parar en el objetivo, mientras en la trayectoria el robot pasa por el objetivo a máxima velocidad.

Por otro lado la necesidad de calibración del robot cada vez que se sustituye la herramienta de trabajo redundante en una pérdida de rendimiento del sistema. Otros fenómenos negativos como son las singularidades y la resolución espacial adquieren mayor peso, que por ejemplo en el caso de robots de soldadura, pues aumenta el riesgo de indeterminación durante la ejecución de la trayectoria de mecanizado.

A continuación se muestran algunos de los robots desarrollados para aplicaciones de mecanizado y sus fabricantes.

FABRICANTE/MODELO	TIPO	APLICACIÓN	IMAGEN
<b>ABB-IRB 6660</b>	Serie	Línea de robot dedicado a aplicaciones de premecanizado en las industrias de fundición y colada.	 <p>ABB IRB 6600</p>
<b>FANUC-F200iB</b>	Paralelo	Robot diseñado para aplicaciones que requieren una rigidez extrema y repetibilidad excepcional en un paquete compacto de gran alcance.	 <p>FANUC F-200iB</p>

<p><b>KUKA-KR 500</b></p>	<p>Serie</p>	<p>Robot desarrollado especialmente para el mecanizado. Resiste fuerzas de proceso más altas debido a los reductores modificados en los principales ejes para procesar hasta 8.000 N. Además, la serie de robots Kuka HA ofrecen una mayor precisión que se traduce en una mejor trayectoria del robot.</p>	 <p>KUKA KR 500</p>
<p><b>Motoman-DX 1350N</b></p>	<p>Serie</p>	<p>Robot compacto y de alta rigidez, utilizado para quitar las rebabas después de la fundición o mecanizado.</p>	 <p>Motoman DX1350N</p>
<p><b>Stäubli-RX 170HSM</b></p>	<p>Serie</p>	<p>Robot diseñado específicamente para aplicaciones de mecanizado de alta velocidad. Se suministra con un husillo de Fischer-Precise de alta velocidad integrado directamente en su antebrazo.</p>	 <p>Stäubli RX170HSM</p>

**Tabla 1.3 Robots desarrollados por los principales fabricantes**

Con el fin de mejorar la flexibilidad y la productividad se considera factible la integración de más de un robot en la celda robotizada además de la integración de un sistema de cambio de herramienta, permitiendo ampliar el área de trabajo y realizar varias operaciones a la vez con la consecuente adaptabilidad a un mayor rango de aplicaciones, reducción de tiempos de fabricación y disminución de costes.

La precisión de la transferencia del objetivo teórico se puede minimizar optimizando datos y parámetros en el sistema de referencia del control del robot. La resolución de los elementos de control es intrínseca al robot, similar para las diferentes marcas, y por tanto solo los fabricantes de robots pueden actuar sobre ellos. En definitiva, la precisión de los elementos mecánicos son el principal condicionante, y existen diversas propiedades físicas que afectan en mayor medida:

- La mejora del juego engranajes y rodamiento del robot para mejorar la continuidad de movimiento mediante la reducción de holguras.
- La resolución y el tiempo de respuesta del servomotores.
- Métodos sencillos de calibración del TCP de la herramienta.

La otra gran barrera técnica existente en las celda de mecanizado robotizado era la falta de paquetes software estándares específicos para robots con la capacidad de simular y trasladar la programación CAD/CAM al lenguaje robot, lo que conocemos como generación y simulación de trayectorias. Los robots industriales han sido concebidos para manipulación de objetos y su programación manual se realizaba mediante memorización de puntos de la trayectoria. La apertura del campo de aplicación de la robótica ha suscitado la necesidad de sistemas de programación computerizados que permitan generar trayectorias robot de manera virtual, ya sea on-line o off-line. El principal problema al que se han enfrentado los desarrolladores de software fue la falta de estándares sobre lenguaje de programación de los robots. La evolución ha sido similar a la de los estándares establecidos para centros de control numérico, los cuales adoptaron los códigos G para el control del movimiento de la máquina y unos códigos M para controlar las funciones de la máquina, y que ha resultado tan útil para la aplicación de programas CAD/CAM por parte de los usuarios de máquinas CNC.

Los recientes desarrollos en este terreno han permitido combinar la tecnología CAD / CAM con la simulación virtual y generación de trayectoria en lenguaje robot<sup>20,21</sup>. Los usuarios finales pueden tomar la información CAD y simular la estrategia de mecanizado. A continuación, estos resultados se pos procesan al lenguaje robot, los que proporciona la trayectoria de la herramienta sobre la pieza a mecanizar con la consecuente reducción de tiempo y costos de programación.

Los propios fabricantes de robots como *ABB, KUKA, Motoman, FANUC, etc.*, han desarrollado paquetes software CAD/CAM específicos para sus propios robots. Otras empresas tales como: *KMT Robotic Solutions, Jabez Technologies, Programming Plus, Inc, etc.*, han desarrollado, de la misma manera, programas específicos de lenguaje robot para ser empleados en cualquier robot sea cual sea el fabricante. A continuación se muestran los principales paquetes software CAD/CAM de programación off-line para robots existentes en el mercado.

- **ABB - RobotStudio Machining PowerPac:** Software CAD/CAM de generación de trayectorias que incluye un control de fuerza y velocidad durante el mecanizado.
- **FANUC – ROBOGUIDE:** Este software contiene el módulo AccuDeflash para el desbarbado y recorte de una gran variedad de plásticos.
- **Kuka - kuka.CAMRob:** Proporciona la simulación del proceso de mecanizado en KUKA.Sim y la optimización de trayectoria.
- **Motoman - Motoman's MotoSim EG:** Software que simula la trayectoria del robot generada a partir del programa de G-code en el mundo virtual, permitiendo que los

---

<sup>20</sup> "Development of a flexible and adaptive robotic cell for small batch manufacturing"; F. Vidal, M.Álvarez, R. González, I. Iglesias, R. Mouriño. IV International scientific conference Contemporary materials (Contemporary materials 2011), Banja Luka-Bosnia and Herzegovina. Vol. II(1) pages 5-12, ISSN: 1986-8669 (Print); 1986-8677 (Online).

<sup>21</sup> "Development of a flexible and adaptive robotic cell for marine nozzles processing"; M.Álvarez, F.Vidal, R. González I.Iglesias.17th IEEE International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2012), Krakow-Poland. Vol.II, page 1502-1510, ISBN: 978-1-4673-4736-5.

programas pueden modelar fuera de línea y después descargarse al controlador del robot.

- **Jabez Technologies – Mastercam/Robotmaster:** Software MASTERCAM permite generar las trayectorias de mecanizado CAM a partir de la pieza CAD que se quiera mecanizar y una vez generadas, simula las trayectorias y convierte el código CNC en código de robot.
- **KMT Robotic Solutions- CamPro:** Es un software de programación off-line que permite convertir trayectorias CAM en programas completos de robots de 6 ejes.
- **Programming Plus, Inc:** Utiliza el software **Power-Mill Dellcam** para convertir el G-code para Kuka Robóticos.

No obstante, aun existen ciertos puntos donde es necesario realizar avances, tales como: estandarización, facilidad de uso, velocidad de ejecución.

En lo concerniente a husillos y herramientas, aunque no se considera una barrera crítica, los fabricantes han desarrollado husillos motorizados de alta velocidad diseñados específicamente para el mecanizado robótico, con características tales como un peso ligero para minimizar el estrés de carga útil en el robot, un sellado avanzado para reducir al mínimo las amenazas de contaminación, la protección de rodamientos mediante aire a presión y refrigeración por agua.. Además, se dispone de herramientas para el mecanizado robotizado en una variedad de formatos estándar tales como HSK, ABS, Grinding Nose, etc.

Aun así cabe indicar que en las tareas de mecanizado no sólo hay que tener en cuenta la herramienta sino también el material, es decir la interacción herramienta-material. En las interacciones entre la herramienta y el material se debe tener presente al diseñar el proceso de mecanizado la herramienta propiamente dicha, de forma que los fabricantes diseñan las herramientas y los protocolos de uso, dependiendo de los materiales con que se vaya a trabajar.

La dureza del material, como ya se ha comentado, es la clave determinante en el proceso de fabricación de mecanizado robótico que se está aplicando actualmente. Con materiales más blandos se está utilizando el mecanizado robotizado en la consecución de productos terminados. Sin embargo, a medida que uno se mueve más arriba en la escala de dureza del material a procesar, el mecanizado robotizado se limita a los procesos de creación de prototipos, componentes y subconjuntos.

Es en esta área, donde se está tendiendo a evolucionar para lograr aumentar el rango de materiales con escalas de dureza más elevadas a los que se emplean actualmente, que sean apropiados para la obtención de productos acabados por sistemas robotizados, mediante: La evolución tecnológica de los robots, husillos y herramientas, y el control de los parámetros que afectan a las principales barreras tecnológicas expuestas en la Tabla 1.2 Barreras tecnicas según el componente del sistema

De esta manera podemos concluir que las limitaciones intrínsecas al robot y su conjunto mecánico son la falta de rigidez, lo que conlleva vibraciones y por tanto rugosidad y falta de precisión. Por tanto, la celda robotizada de mecanizado equivale a una máquina herramienta de baja rigidez, y si se le aplica una fuerza excesiva, cederá. Por lo tanto se deberán evitar acciones que actúen en este sentido, actuando sobre las condiciones de corte adecuadas.

## **4.1. Expectativas de utilización del mecanizado robotizado**

La fabricación de prototipos es una necesidad muy demandada en la industria, sobre todo en los sectores metal-mecánico, naval, automoción, construcción, etc. Esta fabricación se lleva a cabo, en la mayoría de las ocasiones, mediante medios artesanales incapaces de aportar la calidad suficiente, y por profesionales artesanos cada vez más escasos.

Hoy en día, con un ambiente industrial continuamente cambiante y con la reducción cada vez más acusada de la vida del producto, se hace patente la necesidad de producir los prototipos de forma más veloz. Las nuevas metodologías de prototipado rápido tienen el inconveniente de estar limitadas a pequeñas dimensiones y en estos prototipos el coste suele resultar muy elevado para piezas de tamaño mediano.

Actualmente la principal alternativa a los métodos descritos para la fabricación de grandes prototipos es el mecanizado convencional en materiales blandos fácilmente mecanizables (espumas de poliuretano, resinas, aleaciones de aluminio, madera, granito, etc.). Estas operaciones de mecanizado se llevan a cabo en máquinas herramientas muy especializadas y de grandes dimensiones. Sin embargo, gracias a las diferencias a la hora del mecanizado entre estos materiales y los aceros (los esfuerzos de corte son menores, las profundidades de corte y velocidades de corte admisibles son mayores, etc), es posible desenvolver sistemas más versátiles y económicos a través de la utilización del mecanizado robotizado.

Las celdas robotizadas para mecanizado combinan esencialmente dos tecnologías desarrolladas de forma independiente hasta hace unos años. Por un lado está el desarrollo de los robots y por otro lado el mecanizado clásico en máquina herramienta. La robótica nació para resolver problemas de mantenimiento, y, por tanto, con unos requerimientos que difieren completamente de la forma de trabajar en máquina CNC. Esta circunstancia determina que el acercamiento a un mismo trabajo haya de ser distinto para ambos sistemas.

Es por tanto necesario un estudio separado de las capacidades del mecanizado robotizado. Los principales fabricantes de robots actualizan de forma continua a través de revistas y publicaciones una amplia revisión de las aplicaciones que se están resolviendo actualmente mediante el uso de robots en operaciones de mecanizado, tanto para la fabricación producto final como producto intermedio, en diferentes sectores industriales. Los sectores hacia los que se orientan estos avances son el aeroespacial, automóvil, fundición, naval, plásticos y maderero, donde el objetivo es que el robot que manipula la herramienta de trabajo sea capaz de realizar con ciertas garantías operaciones de fresado, amolado, pulido, perforado, corte, desbastado, desbarbado, esmerilado, ranurado, etc.

## **4.2. Conclusiones**

Después de haber realizado una revisión del estado de la técnica sobre celdas robotizadas para el mecanizado de materiales blandos, se concluye:

- Son sistemas con un gran potencial de desarrollo.
- Proporcionan una gran flexibilidad de trabajo.
- Permiten competir con mercados extranjeros.
- Válidos para operaciones industriales donde los CNC están sobrecualificados.

- Todavía existen barreras técnicas que limitan su empleo a medida que aumenta la dureza del material a procesar.

## 5. Avance del estado de la ciencia y la técnica mediante la investigación propuesta

Con la presente investigación se pretende aportar avances en el estado de la ciencia en las siguientes barreras de la celda de mecanizado robotizado:

- **Calibración del robot:** Se propone un nuevo método de calibración del TCP y el Wobj.
- **Rigidez del robot:** Se desarrolla un experimento para determinación de la rigidez del brazo robot que servirá para conocer las desviaciones que provocan las fuerzas en este, y posteriormente compensarlas para mejorar la precisión de las trayectorias.
- **Vibraciones:** Se desarrolla un método para la medición de las vibraciones del robot a distintos niveles para poder contenerlas y mejorar el acabado superficial de la pieza.
- **Estrategias de mecanizado:** Se realiza un estudio de las condiciones de mecanizado robotizado para identificar las estrategias más adecuadas para el procesado de materiales blandos.

# CAPÍTULO II: DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA PREDICTIVA DE APLICACIÓN AL MECANIZADO ROBOTIZADO

## 1. Desarrollo del modelo de interacción entre la mecánica del robot y el proceso de corte

Las operaciones de mecanizado inducen fuerzas de proceso que actúan sobre la estructura de las máquinas. Las altas exigencia a las que son sometidos los robots en estas operaciones provoca desviaciones de la trayectoria programada en el TCP del robot. Este desplazamiento provoca una variación en el espesor de viruta eliminada y por tanto una nueva condición de corte sobre filo de corte que incluye una variación de la fuerza de proceso (véase la más adelantellustración 2.14). Por lo tanto, los robots de mecanizado se caracterizan por una estrecha interacción ente las fuerzas generadas durante el proceso de corte y el comportamiento mecánico del robot. Una evaluación previa de las interacciones generadas por las condiciones de corte sobre la mecánica del robot puede contribuir a reducir fallos de fabricación, así como posibilitar la reprogramación de trayectorias que logren compensar los desplazamiento estimados no deseados.

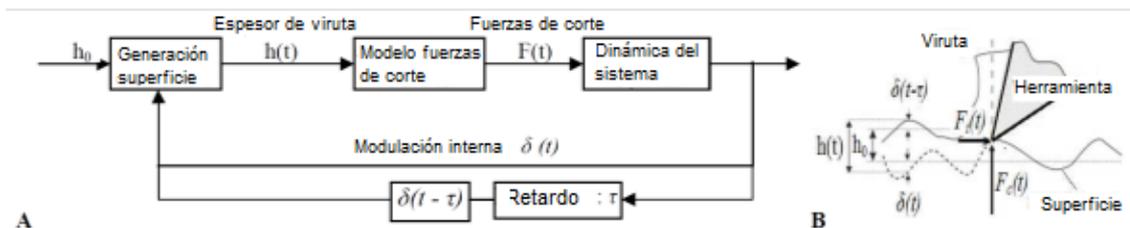


Ilustración 2.14 Modelo Interacción mecánica robot(A) y fuerzas de corte(B)

Esta aportación científica se basa inicialmente en dos modelos ya acoplados por otros autores, mecánico del robot y proceso de corte. El modelo acoplado permite determinar la imprecisión media en trayectoria y nos informa de la amplitud de la vibración durante el proceso de mecanizado. Sin embargo la complejidad de aplicación de este modelo en entornos industriales sugiere el desarrollo de modelos simplificados de fácil aplicación.

Es por ello que en este apartado se desarrollará un nuevo modelo reducido y equivalente, a la dinámica del robot, que permita evaluar, predecir y mejorar la precisión y calidad superficial de una pieza mecanizada mediante robot antropomórfico. La novedad radica en el establecimiento de un modelo que relaciona esfuerzos y comportamiento dinámico del brazo robótico respecto a un sistema de coordenadas cartesiano, y aplicable a distintas configuraciones de ejes bajo unas determinadas condiciones de corte, trayectorias de trabajo, ubicación de la pieza, etc.

Con el fin de simular la interacción entre la máquina y el proceso de corte, y predecir las desviaciones generadas sobre el TCP del robot, se desarrolla un modelo reducido equivalente que relaciona el comportamiento mecánico del robot, adaptado para el robot industrial irb 6660 de ABB, y la fuerza de corte generada durante el mecanizado. La simulación de la dinámica del movimiento del robot se basa en la resolución de ecuaciones diferenciales de movimiento oscilatorio forzado por el proceso de corte. El modelo equivalente de la mecánica del robot es reducido a la dinámica puntual del comportamiento del TCP del robot en

coordenadas cartesianas, y permite considerar las deformaciones elásticas y amortiguamiento en el espacio cartesiano. Este modelo establece una analogía entre las rigideces y amortiguamientos lineales y torsionales, pero no considera otros efectos como pueden ser las holguras de los engranajes.

La caracterización del modelo requiere de cálculo teórico y ajuste experimental para los puntos de trayectoria programados. Las rigideces y amortiguamientos de cada punto del espacio de trabajo dependerán de la configuración de ejes accionados del robot. La determinación de los valores puntuales de rigidez y amortiguamiento del espacio de trabajo de la fresa de mecanizado permitirá generar un "Mapa de distribución dinámica preferente del robot", lo que facilitará la toma de decisiones tales como: ubicación de la pieza en la zona de trabajo, determinar orientaciones de mecanizado preferentes asegurando estabilidad dinámica, mejor orientación del vector fuerza de corte, optimización de los parámetros de corte, etc.

## 1.1. Modelo representativo de la mecánica del robot

La aplicación de este modelo pretende evaluar y caracterizar la rigidez de la celda experimental. Se trata por tanto de obtener la matriz de rigidez que permita relacionar la flexión del TCP bajo esfuerzos conocidos. No se trata de evaluar la rigidez del robot eje a eje, si no la rigidez equivalente en el TCP (x, y, z) para determinados puntos de trayectoria o volumen de trabajo y segundo configuraciones de ejes distintas (Esto dependerá del tipo de trayectoria que vayamos a ensayar, tipo de operación a experimentar, etc). El método más adecuado para determinar la rigidez de los puntos de la trayectoria será aplicar un fuerza F de valor conocido y medir la desviación del TCP para diferentes configuraciones de ejes. Esta comprobación se realizará en el capítulo correspondiente

### 1.1.1. Modelo extendido de la cinemática y dinámica del robot

Tiene especial interés la modelización de la elasticidad del robot, por el alto impacto sobre la precisión del movimiento de este bajo la acción de fuerzas externas, como puede ser la fuerza de corte. El enfoque se basa en una metodología modular para el modelado mediante la integración de ejes arbitrarios de movimiento sin la necesidad de volver a implementar las ecuaciones de la dinámica del robot.

Para el modelado de la cinemática y la dinámica del movimiento del robot nos basaremos en el desarrollo presentado por J. Bauer<sup>22</sup>. Esta aportación científica demuestra que los movimientos elásticos del robot no sólo pueden aparecer alrededor de los ejes de accionamiento del robot, sino que también alrededor de ejes adicionales, obteniendo un modelo cinemático extendido. En esta sección se detalla el modelo desarrollado usando transformaciones homogéneas de una representación matricial 4x4.

$$\begin{aligned}
 Trans(x, y, z) &:= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, Rot(x; \alpha) := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \\
 Rot(y; \alpha) &:= \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & 0 & \sin(\alpha) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, Rot(z; \alpha) := \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

<sup>22</sup> Bauer, J. et al; "Analysis of Industrial Robot Structure and Milling Process Interaction for Path Manipulation"; Process Machine Interactions, Springer; 2011

Para facilitar la lectura se utilizan abreviaturas, que representan las matrices de traslaciones y rotaciones. Según Denavit -Hartenberg un enlace rígido con una articulación de giro puede ser descrito por

$$link_{dh,i} = Rot(z; \theta_i) \cdot Trans(0, 0, d_i) \cdot Trans(0, 0, a_i) \cdot Rot(x; \alpha_i)$$

siendo  $\theta_i$  la posición actual de la articulación, y las constantes  $d_i$ ,  $a_i$  y  $\alpha_i$  la posición relativa de la próxima junta. Estas articulaciones, que son accionados para mover el robot, se denominan articulaciones conductoras. Cabe señalar, que esta no contempla información sobre la colocación precisa de la articulación. Como

$$Trans(0, 0, p_i) \cdot Rot(z; \theta_i) \cdot Trans(0, 0, d_i - p_i) = Rot(z; q_i) \cdot Trans(0, 0, d_i)$$

sostiene dicha publicación, q las articulaciones pueden estar en cualquier lugar sobre el eje z del sistema de coordenadas respecto a la relación anterior. Para permitir la colocación precisa de la articulación, se extendió el modelo mediante un desplazamiento  $p_i$  de la articulación, dando lugar a

$$link_{wrep,i} = Trans(0, 0, p_i) \cdot Rot(z; \theta_i) \cdot Trans(0, 0, d_i - p_i) \cdot Trans(0, 0, a_i) \cdot Rot(x; \alpha_i).$$

Este modelo se extendió para dos rotaciones alrededor de ejes variables, ortogonales al eje de la articulación, lo que lleva al modelo cinemático extendido

$$link_{ext,i} = Trans(0, 0, p_i) \cdot Rot(z; \theta_i) \cdot Rot(x; \theta_{x,i}) \cdot Rot(y; \theta_{y,i}) \cdot Trans(0, 0, d_i - p_i) \cdot Trans(0, 0, a_i) \cdot Rot(x; \alpha_i)$$

siendo  $\theta_{x,i}$  y  $\theta_{y,i}$  los ángulos de rotación causados por las elasticidades en torno a los ejes adicionales. Estos ejes de revolución adicionales se denominan articulaciones virtuales (Figure 2.1). Cabe señalar que estas articulaciones virtuales son opcionales. Una o ambas articulaciones virtuales pueden ser agregadas en cada accionamiento, si las elasticidades adicionales necesitan ser modeladas para este eje.

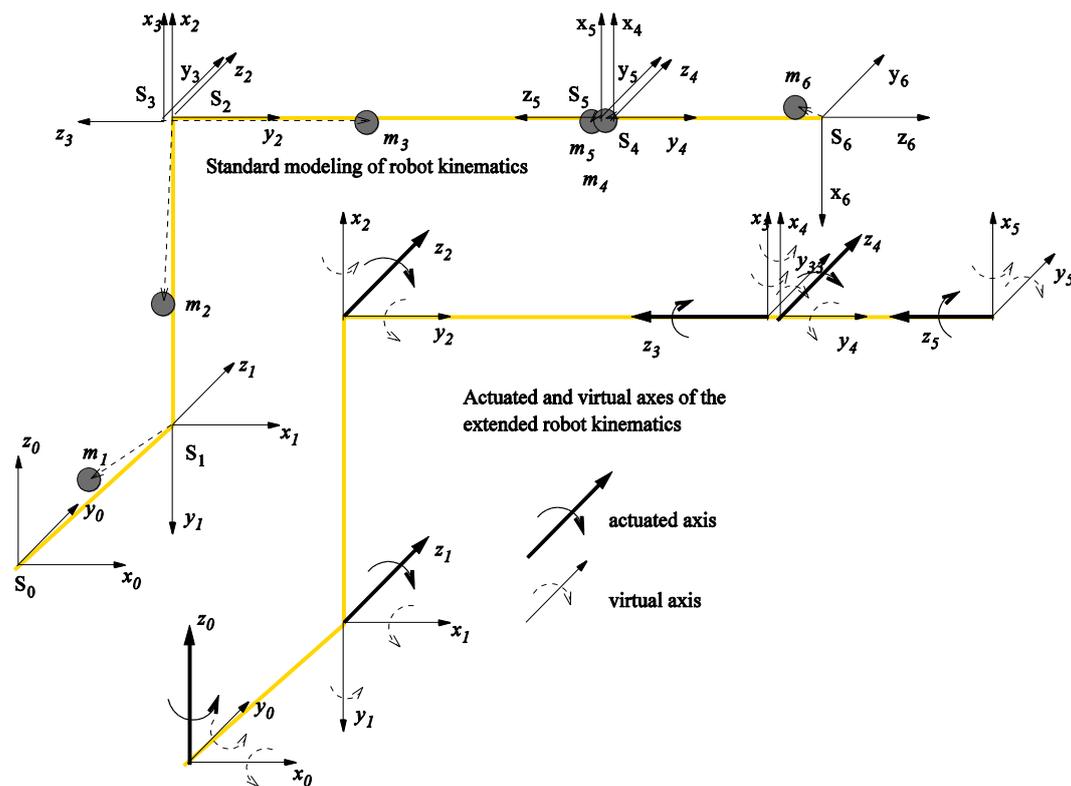


Ilustración 2.15 Modelado del Robot con la inclinación en los ejes virtuales

La simulación de la dinámica de movimiento del robot requiere parámetros adicionales para cada eje. Concretamente se trata de la masa  $m_i$ , el tensor de inercia  $I_i$  y el centro de masas  $com_i$  para cada eje. En la implementación realizada en dicho trabajo, el centro de masa se describe con respecto a la estructura de coordenadas definido por  $link_{ext,i}$ . El tensor de inercia se resuelve en el centro de masa en un sistema de coordenadas utilizando la misma orientación que el sistema definido por la articulación.

Este modelo ha sido validado por para robots antropomórficos de 6 ejes accionados, pero nosotros hemos tenido que adaptarlo a las peculiaridades de nuestro robot experimental, pues este modelo incorpora paralelogramo para coordinación simultanea de las articulaciones 2 y 3, utilizando un solo motor de accionamiento. Es decir, la cinemática del robot presenta 5 ejes accionados y 3 ejes pasivos adicionales.

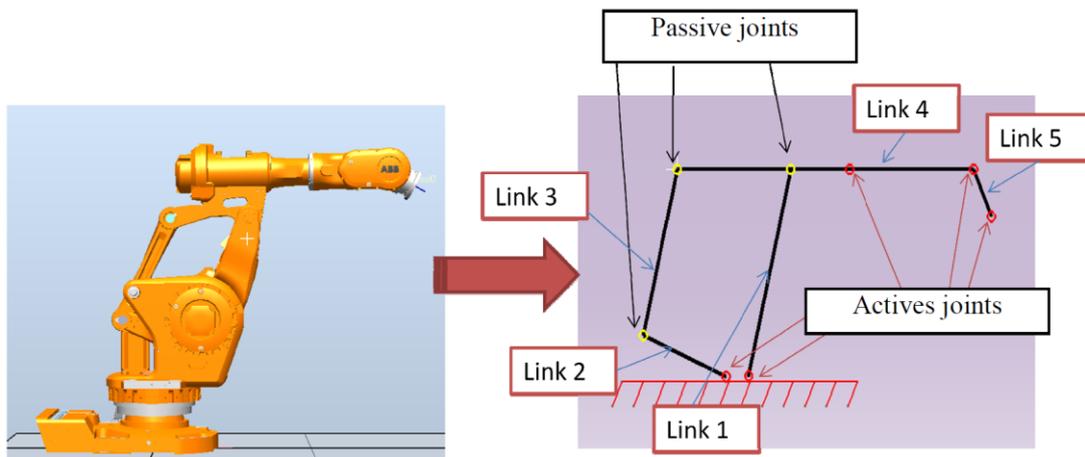


Ilustración 2.16 Representación simplificada del robot ABB IRB 6660

La simulación de movimientos del robot requiere información del par que actúa sobre cada articulación del robot (ya sea real o virtual). Como se considera que ni la información de tren de transmisión del robot ni la estrategia de control de los motores es conocida, se hace la hipótesis de que cada motor está en su posición deseada  $q_i$  y se mueve con la velocidad deseada

$\dot{q}_i$ . Los motores están acoplados a las articulaciones mediante un sistema muelles-amortiguador con una rigidez de resorte  $K_i$ , amortiguación  $D_i$  y holgura en engranaje  $s_i$  que conduce a la siguiente ecuación

$$\tau_i = D_i \cdot (\dot{\theta}_i - \dot{q}_i) + K_i \begin{cases} ((q_i - s_i) - \theta_i) & , \text{ if } (q_i - \theta_i) \geq s_i \\ ((q_i + s_i) - \theta_i) & , \text{ if } (q_i - \theta_i) \leq -s_i \\ 0 & , \text{ else} \end{cases}$$

para los pares en las articulaciones accionadas (Ilustración 2.16). Se debe tener en cuenta que este supuesto también permite la elasticidad y la amortiguación alrededor de los ejes de accionamiento, que pueden ocurrir debido a los engranajes utilizados en el tren de transmisión.

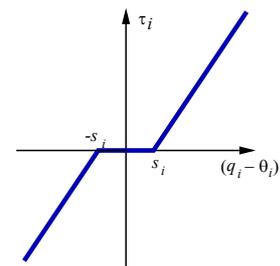


Ilustración 2.17 e Modelado de holguras en engranajes

Los pares que actúan sobre las articulaciones virtuales se calculan de la misma manera con la excepción de que la posición y la velocidad deseada siempre son cero y que no hay holguras,

$$\tau_{x|y,i} = K_{x|y,i} \cdot \theta_{x|y,i} + D_{x|y,i} \cdot \dot{\theta}_{x|y,i} \cdot$$

La dinámica del movimiento de un robot es descrita por la ecuación

$$\mathbf{M}(\boldsymbol{\theta}) \cdot \ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{C}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) + \mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}) = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{S}(\mathbf{F}_{xyz,tool}, \boldsymbol{\theta})$$

siendo  $\boldsymbol{\theta} = (\theta_1, \theta_{x,1}, \theta_{y,1}, \dots, \theta_n, \theta_{x,n}, \theta_{y,n})^T$  las posiciones de todas las articulaciones (accionadas o virtuales),  $\boldsymbol{\tau} = (\tau_1, \tau_{x,1}, \tau_{y,1}, \dots, \tau_n, \tau_{x,n}, \tau_{y,n})^T$  los pares en todas las articulaciones y S los pares de torsión causadas por el proceso de fresado en las respectivas articulaciones.

Existen diferentes maneras de calcular la matriz de masa M, el vector de fuerzas Coriolis C y las fuerzas gravitacionales G en este modelo. El planteamiento modular escogido para representar la estructura del robot puede resolverse mediante algoritmos basados en la formulación dinámica del robot de Newton-Euler.

#### 1.1.2. **Modelo reducido equivalente de la mecánica del robot**

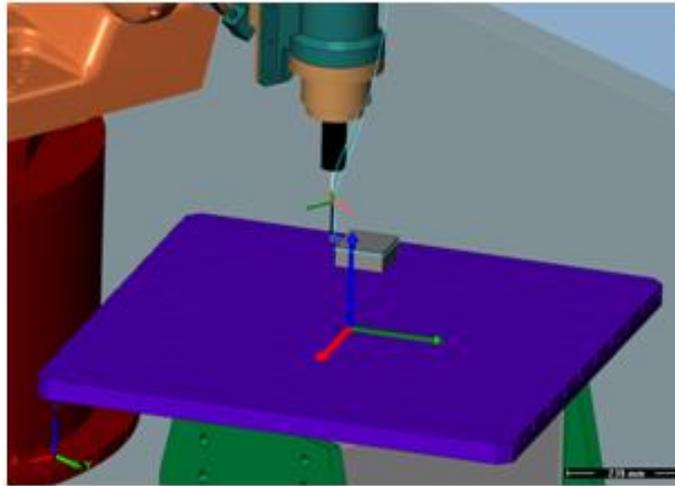
Como se ha comentado en anteriores apartados del presente documento, esta investigación tiene como finalidad aportar metodología predictiva para la mejora del mecanizado robotizado, generando una serie de procedimientos fundamentados y orientados hacia usuario final de máquina herramienta que desea incorporar la tecnología robótica a su proceso de fabricación.

En este sentido el modelo mecánico extendido de la cinemática y dinámica del robot de J.Bauer, siendo un modelo formulado con rigor y alta aproximación, debe ser reducido a un modelo simplificado que permita una resolución del problema mediante una carga computacional menor, aun en detrimento de una menor aproximación en la predicción del comportamiento mecánico del robot. Y es que el sofisticado y minucioso trabajo que es necesario llevar a cabo para caracterizar e identificar los parámetros fundamentales del comportamiento mecánico del robot supone un barrera o dificultada añadida desde una perspectiva práctica o de aplicación, que puede ser salvada mediante el desarrollo de un modelo reducido que presente analogía mecánica equivalente con el modelo extendido del robot antropomórfico.

En esta investigación se propone independizar la simulación cinemática del robot, ya resuelto mediante diferentes software, y centrar el problema exclusivamente sobre el comportamiento dinámico del TCP del robot.

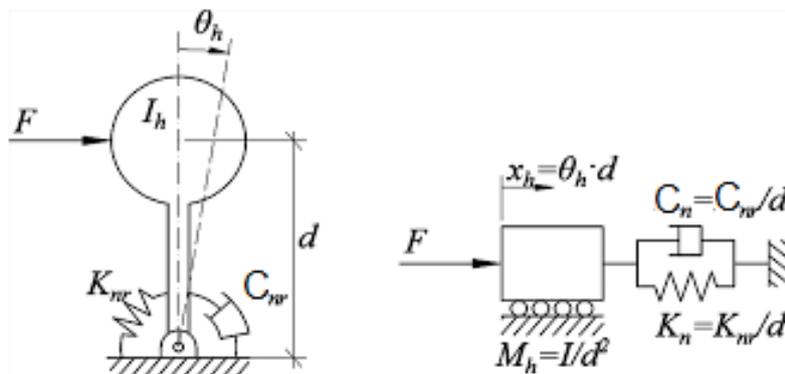
A continuación se representa gráficamente la analogía entre la mecánica extendida de un robot antropomórfico y la dinámica generalizada al espacio cartesiano con la que se caracterizará el modelo reducido equivalente.





**Ilustración 2.19 Representación del sistema cartesiano en TCP del robot**

La particularización del modelo reducido desarrollado para una dirección del espacio cartesiano contribuye a comprender de mejor manera la segunda simplificación del problema, necesaria para resolver el sistema de ecuaciones planteado de manera rápida y sencilla. En la imagen se muestran las rigideces y amortiguamientos lineales y torsionales de cada eje, así como la relación de equivalencia entre ellas.



**Ilustración 2.20 Representación analógica del robot ABB IRB 6660**

Por tanto es factible establecer una relación analógica del modelo dinámico de la mecánica del robot respecto al modelo reducido de la dinámica del sistema cartesiano, pues las rigideces y amortiguamientos torsionales de la mecánica del robot pueden representarse rigideces y amortiguamientos equivalentes referidas al sistema cartesianos del TCP.

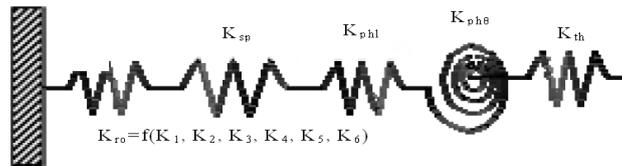


**Ilustración 2.21 Representación analógica del robot ABB IRB 6660**

El planteamiento a nivel experimental consistirá en evaluar por un lado la rigidez de todos los elementos, no solo las referentes al robot, mediante ensayos experimentales específicos, consistentes en aplicar una carga conocida y medir la deformación que inducida en los puntos  $P_i$ , para las tres direcciones del sistema cartesiano.

A continuación se describen parámetros de modelización del sistema para una dirección del sistema cartesiano:

- Rigidez estática de la herramienta,  $K_{th}$ : mide la rigidez en la punta de la herramienta.
- Rigidez estática del porta herramienta,  $K_{phl}$  y  $K_{ph\theta}$ : Su rigidez se modeliza como la combinación de una rigidez lineal y otra rigidez angular.
- Rigidez estática del cabezal,  $K_{sp}$ : su rigidez se especifica en catálogo o mediante comprobación experimental.
- Rigidez estática del robot,  $K_{ro}$ : mide la rigidez estáticas de los ejes  $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5$  y  $K_6$ , incluyéndose los errores de posicionamiento, rectitudes, etc.



**Ilustración 2.22 Rigidez global para una direccion.**

La expresión que representa la cadena de rigidez global del sistema es:

$$1/K_{global} = 1/K_{th} + 1/K_{phl} + 1/K_{ph\theta} + 1/K_{sp} + 1/K_{ro}$$

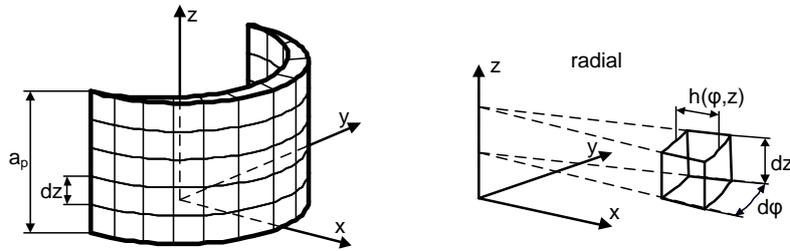
Como resultado, podremos establecer las siguientes conclusiones prácticas:

- Determinación de los elementos de mayor flexibilidad del sistema.
- Rigidez del sistema amarre de herramienta: HSK, ISO.
- Influencia de los parámetros de herramienta: diámetro, longitud, material, etc.
- Criterios de selección de robot según rigidez requerida por la aplicación.
- Determinación de áreas de trabajo con precisiones admisibles.
- Establecer criterios de generación de trayectorias más convenientes.

La determinación de la constante de amortiguamiento se realizará a nivel experimental, evaluando los valores globales obtenidos directamente sobre el TCP del robot.

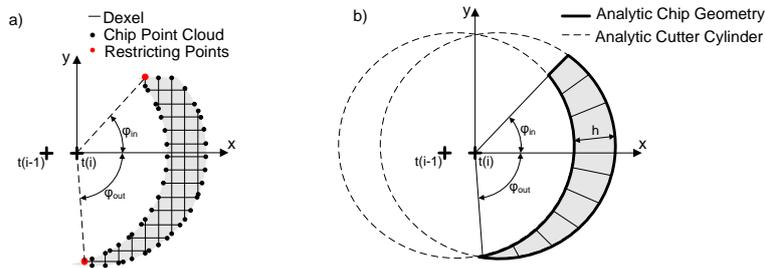
### 1.1.3. Modelado de las fuerzas de corte

Para simular la eliminación de material representa el volumen de la viruta mediante discretización de la nube de puntos. La geometría se define por el espesor angular de la viruta  $h(\varphi, z)$  con la entrada y salida ángulos  $\varphi_{in}$   $\varphi_{out}$ . A medida que el espesor de la viruta varía a lo largo del borde de corte se subdivide en discos de la  $dz$  altura y en  $d\varphi$  en la dirección angular (véase la Ilustración 2.16).



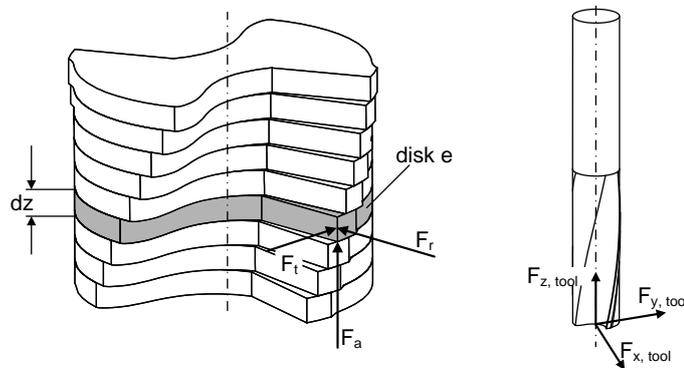
**Ilustración 2.23 Discretización de la geometría de la viruta.**

El espesor de la viruta se calcula en tres pasos. En el primer paso, el conjunto de puntos se subdivide en discos de la altura  $dz$ . En el paso siguiente, en el interior de cada disco de los puntos angulares-máximo se definen la restricción de puntos por  $\varphi_{in}$  y  $\varphi_{out}$  (Ilustración 2.17). Debido a las complejas condiciones de contacto y las geometrías de viruta, los ángulos de entrada y salida varían con la profundidad de corte  $a_p$ . La geometría de la sección transversal de cada disco se calcula en base a la forma cilíndrica de la fresa en el momento discreto  $t_i$  and  $t_{i-1}$ . El área entre la  $\varphi_{in}$  ángulo de entrada y salida ángel  $\varphi_{out}$  se discretiza en varias subáreas con distancia angular  $d\varphi$ . El valor del espesor de la viruta discreto  $h(\varphi, z)$  con respecto a  $\varphi$  se calcula mediante una línea de intersección con los dos cilindros en paso final.



**Ilustración 2.24 Cálculo del espesor de viruta  $h(\varphi, z)$ .**

Añadiendo todos los niveles de disco juntos, se extrae un gráfico del espesor de la viruta  $h(\varphi, z)$ , que representa la base del cálculo de la fuerza, operación aritmética utilizada para la simulación de eliminación del material. Para la predicción de los esfuerzos de mecanizado se utiliza el modelo de fuerza de corte estándar basado en Altintas<sup>24</sup>, donde se desprecia el tiempo de retardo responsable de la vibración autoinducida durante el proceso de conformado. De acuerdo con la discretización de la geometría de la herramienta de corte, se seccionan discos de  $dz$  altura.



**Ilustración 2.25 Cutting force calculation**

<sup>24</sup> Altintas, Y.; "Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations and CNC Design"; Cambridge University Press; 2000

En cada disco  $e$ ,  $F_{rta,j}$  representa la fuerza por diente  $j$  en dirección radial, tangencial y axial,

$$F_{rta,j,e} = K_c \cdot dz \cdot h_j(\varphi, z) + K_e \cdot dz.$$

Dependiendo de la posición angular  $j$  del diente de un disco, se inserta el espesor de viruta correspondiente  $h_j(\varphi, z)$ . Los coeficientes de fuerza de corte  $K_c = [K_{rc}, K_{tc}, K_{ac}]$  and  $K_e = [K_{re}, K_{te}, K_{ae}]$  son identificados de antemano.

Una transformación de  $F_{rta,j,e}$  con  $T(\varphi)$  y el sumatorio resultante que considera todos los dientes  $N_z$  y discos  $N_e$ , obteniendo la ecuación para cálculo de la fuerza de proceso  $F_{xyz,tool}$  sobre la herramienta, dada respecto a una sistema de coordenadas de herramienta no rotatorio,

$$F_{xyz,tool} = \sum_{e=1}^{N_e} \sum_{j=1}^{N_z} T_j(\varphi) \cdot F_{rta,j,e}.$$

La fuerza  $F_{xyz,tool}$  de la herramienta actúa sobre el TCP del robot y por lo tanto representa el modelo de fuerza de corte que se acoplará con el modelo mecánico reducido del robot.

## 1.2. Procedimiento para determinar las matrices de rigidez y amortiguamiento

Para determinar las matrices de rigidez  $K_r(P_i, \theta_1, \dots, \theta_n)$  y amortiguamiento  $C_r(P_i, \theta_1, \dots, \theta_n)$  del brazo robot se ha desarrollado un método sustentado en los principios físicos básicos de oscilaciones amortiguadas<sup>25</sup>. Considerado un sistema amortiguado lineal con resorte elástico y amortiguamiento viscoso, análogo a la solución particular del modelo reducido para una sola dirección del TCP del robot, si este se desplaza de su posición ideal y se elimina la fuerza externa que genera dicho desplazamiento, comenzará a generar una vibración amortiguada hasta alcanzar la posición de equilibrio estable.

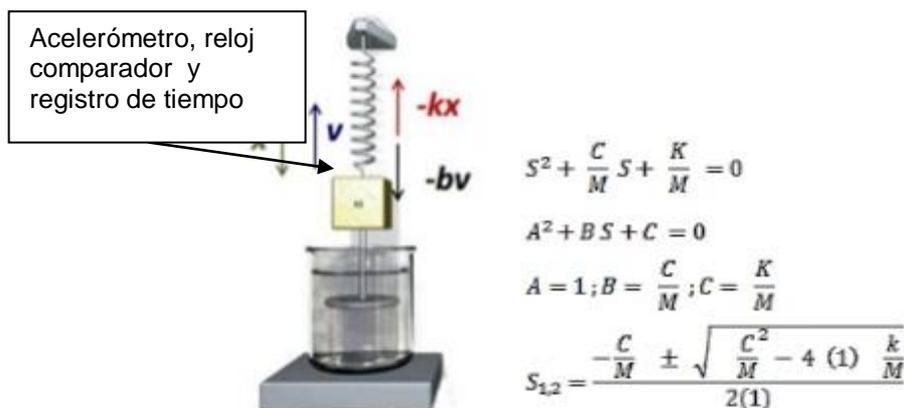
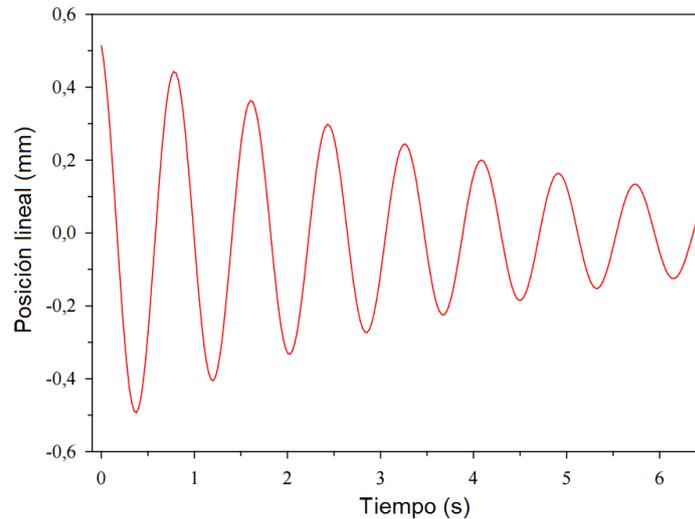


Ilustración 2.26 Esquema y formulación básica del procedimiento

Para la determinación de la matriz de rigidez del robot sería suficiente evaluar las desviaciones de TCP bajo la acción de una fuerza estática conocida, y según las direcciones de los ejes cartesianos del modelo reducido equivalente. Para determinar la matriz de

<sup>25</sup> Losada J.M, "Teoría de mecanismos y máquinas-Mecánica fundamental", Tórculo ediciones, ISBN 84-89641-42-0 (1995).

amortiguamiento es necesario además determinar el tiempo y posición del TCP desde que se retira la fuerzas externa hasta que se alcanza la nueva posición de equilibrio estático.



**Ilustración 2.27 Grafica de posición lineal frente a tiempo de estabilización**

Por tanto, el procedimiento desarrollado consiste en realizar la aplicación de una fuerza externa conocida sobre el TCP, retirarla instantáneamente y proceder a medición de la deformación tridimensional, tiempo transcurrido y aceleración registrada.

Para el montaje se ha empleado un compensador neumático **PushCorp AFD1200**, encargado de ejercer y medir los esfuerzos. Para la medición de las deformaciones se han empleado relojes comparadores **Mitutoyo** con sensibilidad de medida de 0,001 mm que debeidamente sujeto permite garantizar que la punta del reloj comparador está siempre en contacto con la herramienta de referencia. También se han diseñado una serie de utillajes para montar el equipo experimental que se muestra en la siguiente figura.



**Ilustración 2.28 Imagen y especificaciones del compensador**

Si bien han sido evaluados experimentos de medición de rigidez alternativos, finalmente se ha desarrollado una metodología de ensayo propia, que consiste en la aplicación de una fuerza en la herramienta, en varios posiciones del robot, las correspondientes a las futuras posturas de robot en trayectoria de mecanizado, mediante un cilindro compensador de esfuerzos ubicado en la mesa giratoria. Los datos de las fuerzas aplicadas se registran mediante la utilización de una célula de carga acoplada a la muñeca robot. Las deformaciones del brazo se miden analógicamente gracias a un reloj comparador en contacto con la herramienta. Se sincronizan los registros de tiempo entre ambos elementos y con un acelerómetro adicional que se sitúa solidario a la fresa de corte. En la siguiente figura se puede

apreciar uno de los montaje del equipo utilizado para determinación de las matrices de rigidez y amortiguamiento.



**Ilustración 2.29 Montaje del equipo**

Con los datos recabados se han realizado los cálculos pertinentes resolviendo la ecuación clásica descrita anteriormente.

### **1.3. Procedimiento para monitorización**

En este apartado se describirán métodos para medición de las fuerzas de corte y las vibraciones del proceso de mecanizado. Para la medición de los esfuerzos de corte sobre la herramienta de mecanizado se empleará una célula de carga que debidamente monitorizada permitirá registrar los valores de fuerza para las respectivas posiciones de la trayectoria. Del mismo modo se implementará un acelerómetro triaxial con el que registrar las vibraciones que se dan durante el proceso. Ambos métodos de monitorización se coordinaran debidamente para registrar los valores de fuerza y vibración durante la trayectoria de fresado.

#### **1.3.1. Sensorización de las vibraciones**

Dicho lo cual, ha sido necesario desarrollar un método de identificación de las frecuencias naturales del brazo articulado. El primer ensayo ha consistido en una prueba de impacto (*hammer Impact*) y el estudio de cómo afectan las frecuencias naturales en todo el sistema. Un segundo nivel de aplicación del método de medición ha sido observar cómo actúan las frecuencias naturales del robot cuando el electrohusillo está en funcionamiento y finalmente se ha ampliado el estudio de las frecuencias de vibración al mecanizado de materiales blandos.

Con el fin de poder cuantificar las frecuencias de las vibraciones que se producen en todo el sistema robótico tanto cuando es sometido a un impacto en estático como cuando el sistema está en funcionamiento, se ha empleado un acelerómetro piezoeléctrico **Analog Devices ADXL325** como el de la siguiente imagen.

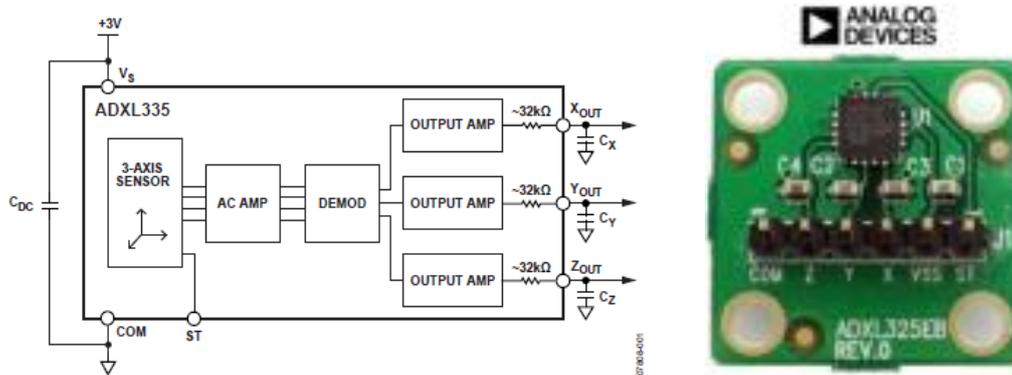


Ilustración 2.30 Esquema Acelerómetro

### 1.3.2. Sensorización de los esfuerzos sobre el robot

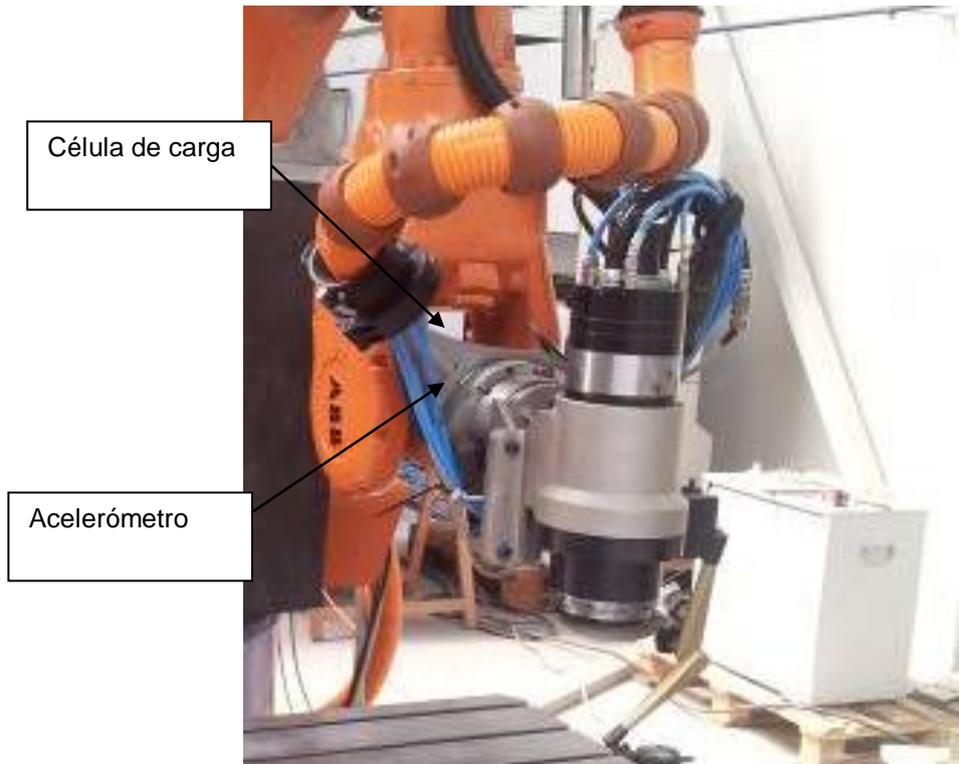
Para correlacionar los desplazamiento provocados por una fuerza externa al brazo robótico, es necesario medir las acciones generadas por el proceso de corte. Para la lectura de los esfuerzos que aparecen durante el mecanizado se ha optado por la integración de una célula de carga piezoeléctrica **Omega160 IP65**. La utilización de dicha célula ayuda a realizar las correcciones necesarias de las trayectorias del TCP por la falta de rigidez del brazo robot y así conseguir mejorar las condiciones de mecanizado. En la siguiente tabla se especifican sus características físicas.

Sobrecarga de un solo eje	
Fxy	±18000 N
Fz	±48000 N
Txy	±1700 Nm
Tz	±1900 Nm
Rigidez (Calculada)	
X-axis & Y-axis forces (Kx, Ky)	$7.0 \times 10^7$ N/m
Z-axis force (Kz)	$1.2 \times 10^8$ N/m
X-axis & Y-axis torque (Ktx, Kty)	$3.3 \times 10^5$ Nm/rad
Z-axis torque (Ktz)	$5.2 \times 10^5$ Nm/rad
Frecuencia de resonancia (Medida)	
Fx, Fy, Fz	1300 Hz
Fz, Tx, Ty	1000 Hz
Especificaciones físicas	
Weight*	2.72 kg
Diameter*	160 mm
Height*	56 mm



Tabla 2.4 Características físicas de la célula de carga

En la siguiente imagen se muestra la disposición de los elementos seleccionados sobre el robot de la celda de mecanizado.



**Ilustración 2.31 Montaje rela del prototipo.**

### 1.3.3. Monitorización de esfuerzos durante el mecanizado

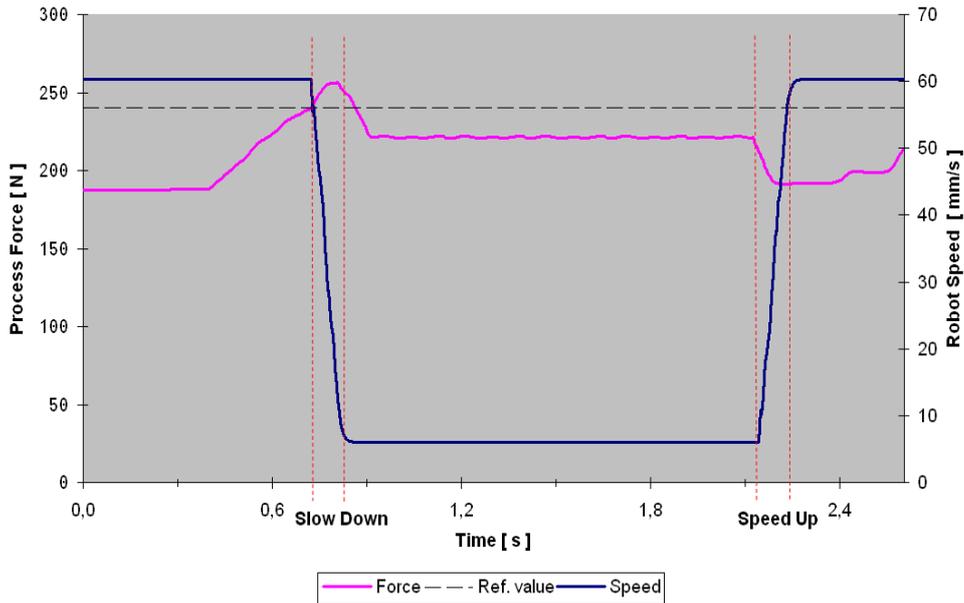
Con el fin de la adquisición de los datos de vibraciones y distancias del sistema sometido a estudio, se ha dispuesto de una tarjeta **Bus-Powered Multifunction DAQ NI 6008** de **National Instruments** como la que se muestra en la Ilustración 2.32.



**Ilustración 2.32 Tarjeta de adquisición de datos.**

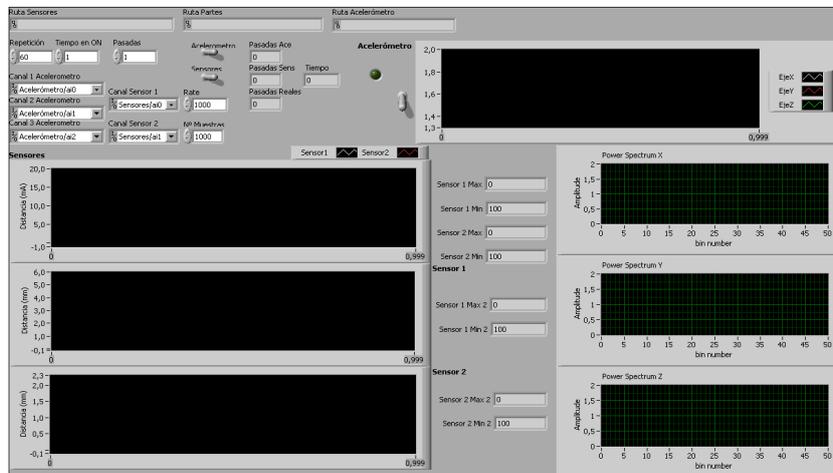
A través de una entrada analógica de los datos recogidos por los sensores, la tarjeta (Una para la adquisición de datos del acelerómetro y otra para los sensores inductivos) registra y almacena los datos y a través de una salida digital, envía al ordenador dichos datos para reflejarlos en el software.

Para monitorizar y registrar tanto los esfuerzos del proceso de conformado como las vibraciones de la herramienta durante la ejecución de las pruebas de mecanizado es necesario implementar dispositivos de medición. Para el registro de los esfuerzos se ha seleccionado una célula de carga piezoeléctrica **Omega160 IP65**, capaz de medir sobre la muñeca del robot la fuerza y el par en las tres direcciones de una sistema ortogonal. La monitorización de la señal de la célula de carga se realiza a través de la tarjetas analógicas incorporadas en la unidad de control del robot.



**Ilustración 2.33 Interface del sistema medición de fuerza**

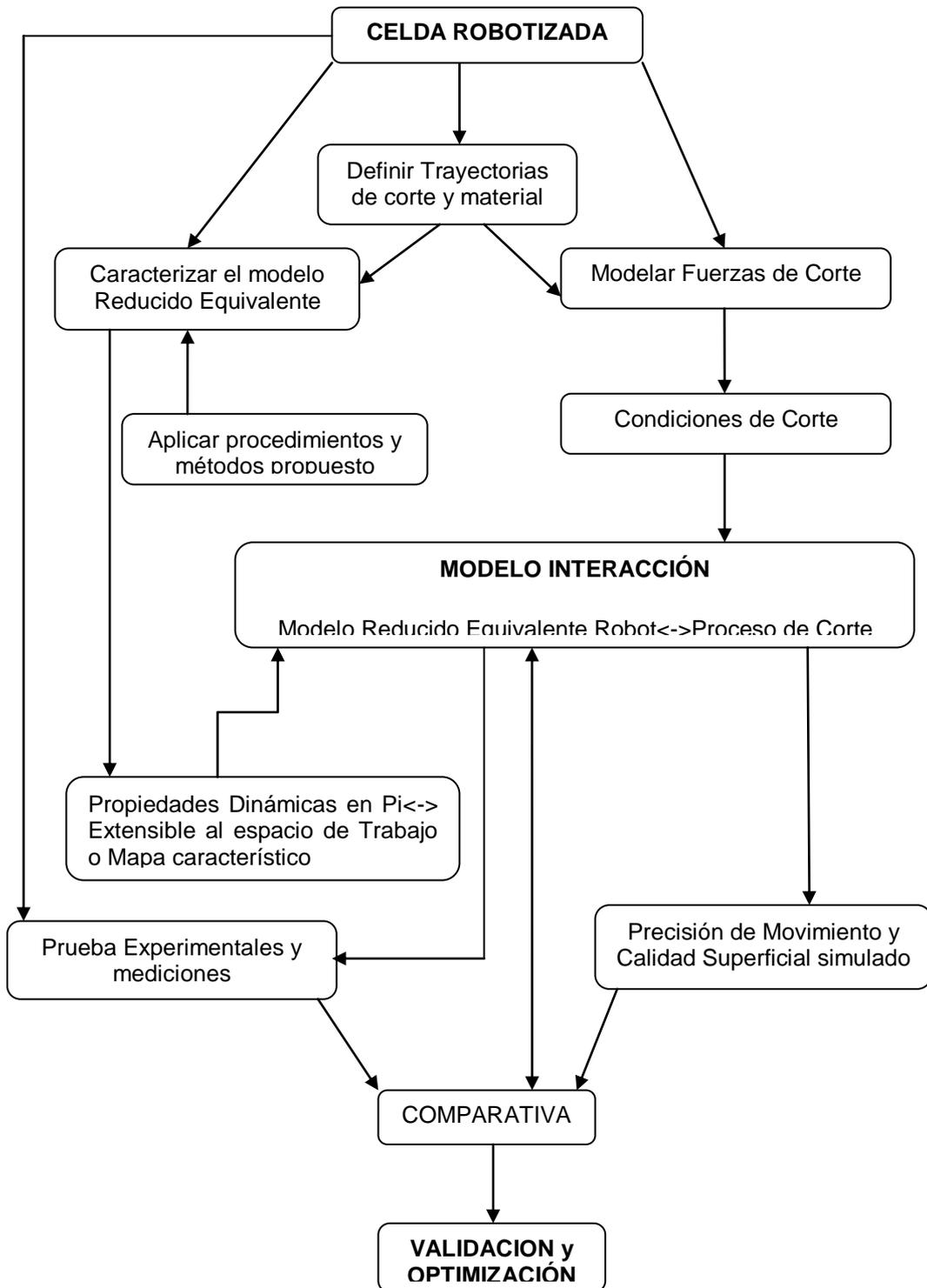
Para monitorizar la señal del acelerómetro se ha empleado un software con interfaz representada en la siguiente imagen, en la que muestra los valores de medición a través de gráficas. El software **NI-DAQmx**, es más que un controlador básico de adquisición de datos y brinda mayor productividad y rendimiento en el desarrollo de aplicaciones de adquisición de datos y control, incluyendo dispositivos de acondicionamiento de señales de NI. La configuración de la programación se realiza es *LabVIEW*.



**Ilustración 2.34 Interface del software NI-DAQmx**

## 2. Desarrollo de la metodología predictiva aplicada al mecanizado robotizado

En la siguiente imagen se muestra el diagrama representativo de la "Metodología predictiva para mejora de la precisión y calidad superficial aplicada al mecanizado robotizado". Este esquema representa la guía de actuación para caracterización de la celda CMR, validación del modelo de interacción y optimización de variables del proceso de corte en la fase experimental que se expondrá en capítulo siguiente.



### 3. Desarrollo de la celda experimental

El diseño y dimensionado de la celda se ha realizado acorde con las necesidades de trabajo al que va dirigida esta metodología, reproduciendo lo más fielmente posible las condiciones de trabajo en cualquier ámbito industrial que precise esta estrategia de mecanizado para facilitar así su implantación en la sociedad.

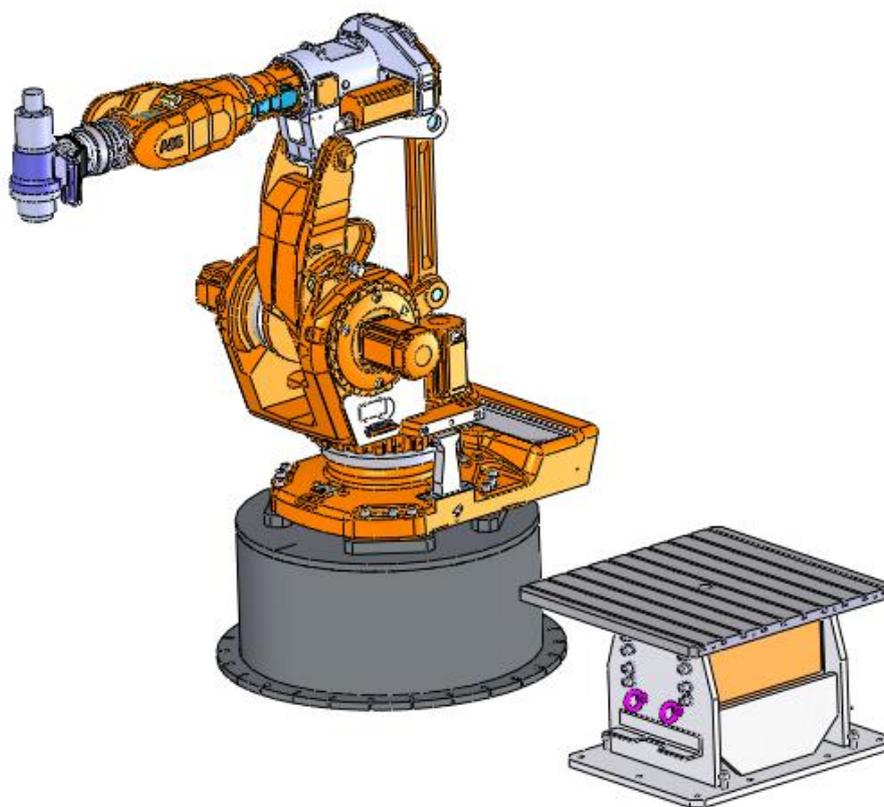


**Ilustración 2.35 Disposición robot y mesa rotativa**

Se ha desarrollado una celda experimental compuesta por un robot antropomórfico, una unidad rotatoria de posicionamiento giratorio, un electro husillo de mecanizado, un convertidor de frecuencia y los complementos/accesorios específicos. Los elementos seleccionados han sido previamente estudiados y evaluados junto a diferentes alternativas presentes en el mercado para finalmente seleccionar los componentes más adecuados para la ejecución de la experimentación realizada.

### 3.1. Diseño, desarrollo e integración del sistema prototipo.

Tras establecer los criterios constructivos y la selección de robot y mesa rotativa se ha procedido al diseño de la celda de trabajo. Se han realizado diversas pruebas de alcance, en diferentes posiciones relativas entre el robot y el área de trabajo requerido, considerando el electro husillo seleccionado. El dimensionamiento de la celda se especifica en los planos constructivos, donde están completamente definidas las distancias relativas entre los elementos a instalar (Ref. plano 001-170-00.000) tal y como se muestra en la **Ilustración 2.35**.



**Ilustración 2.36 Disposición robot y mesa rotativa**

Después de las sucesivas pruebas se ha optado por una disposición de celda como la de la imagen. Además se han establecido unos requerimientos medios que han permitido dimensionar la celda de trabajo. En resumen:

- El volumen del espacio de trabajo disponible para ejecutar las operaciones de mecanizado es de 1 m<sup>2</sup> de superficie y 1 metro de altura.
- Se prevé necesario un manipulador con 6 ejes de libertad.
- Para garantizar la accesibilidad de la herramienta se requiere de un 7 eje de movimiento.
- La celda de trabajo dispondrá de unos cierres de protección, delimitando un área mínima de 16 m<sup>2</sup>.

- Las piezas a fabricar tendrán un peso máximo de 1.000 Kg.

Para la realización del mecanizado se ha necesitado el empleo de un electromandrino o electrohusillo, mostrado en la **Ilustración 2.37** junto con datos de relevancia en el conjunto, que permite realizar todas las operaciones que sean necesarias para el conformado de materiales blandos y que va acoplado por medio de unos soportes a la muñeca del robot.

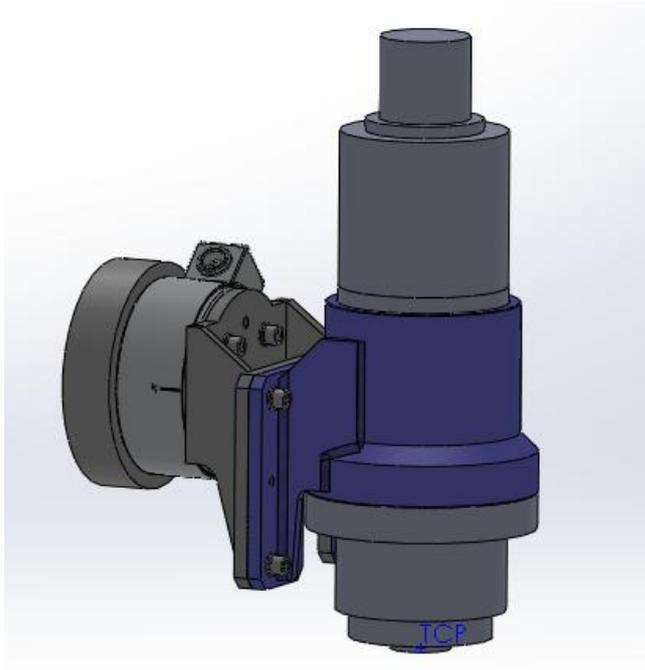


Tabla de peso, CG y TCP Virtual	
Peso	76,534 Kg
Centro gravedad	X = -5.04 Y = 0.30 Z = 225.67
TCP	X: 212.50mm Y: 0mm Z: 279.91mm

**Ilustración 2.37** Electrohusillo y datos de peso, CG G y TCP virtual

El Robot se ha situado sobre una peana y la unidad rotativa se ha montado sobre un soporte. El electro husillo se ha amarrado a la muñeca del robot mediante un acoplamiento debidamente diseñado. Se ha dispuesto de un corrugado para paso de mangueras de refrigeración, neumática, cables de señal y potencia. El robot incorpora una unidad de control, **ABB IRC5**, en la que se ejecutan los programas de mecanizado, así como el control de los diferentes equipos auxiliares.

El electro husillo se alimenta desde un convertidor de frecuencia **SM-PROFIBUS DP-V1**, encargándose de inyectar la corriente necesaria para la velocidad de giro deseada. El electro husillo seleccionado ha requerido la implantación de equipos auxiliares: Sistema de refrigeración del electro husillo, sistema neumático para soplado y cambio de herramienta, modulo para medición de la velocidad de giro y un sistema de protección térmica. Se dispone de un cuadro eléctrico para el montaje de todos los dispositivos eléctricos, así como una cabecera de comunicación **Profibus** que es gobernada por la controladora **IRC 5**.

### 3.1.1. Selección del robot industrial

Cuando se desea robotizar un determinado proceso, el equipo de técnicos responsable de esta tarea debe seleccionar el robot más adecuado. Para ello recurrirá a su experiencia y buen criterio, escogiendo dentro del amplio mercado de robots existente, aquel que mejor

responda a las características necesarias y buscando siempre el adecuado compromiso entre precio y prestaciones. Entre los diferentes aspectos que se deben valorar destacamos:

Características	Propiedad
Geométricas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Área de trabajo</li> <li>- Grados de libertad</li> <li>- Errores de posicionamiento: Distancia tras emergencia, repetitividad y resolución</li> <li>- Errores en el seguimiento de trayectorias: Calidad de una línea recta, arco, precisión cuando se mueve el mínimo incremento posible.</li> </ul>
Cinemáticas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Velocidad nominal máxima</li> <li>- Aceleración y deceleración</li> <li>- Movimientos punto a punto</li> <li>- Movimientos coordinados</li> <li>- Trayectorias continuas (CP)</li> </ul>
Dinámicas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fuerza de Agarre</li> <li>- Carga máxima</li> <li>- Control de fuerza-par</li> <li>- Frecuencia de resonancia</li> </ul>
Modo programación	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Enseñanza (guiado)</li> <li>- Textual</li> </ul>

Finalmente, en base a los datos recabados a los criterios anteriores, el robot que ofrece mejores prestaciones, y que mejor se adapta al proceso de mecanizado de materiales blandos es el **ROBOT IRB 6660 - 205/1.9**, Ilustración 2.38. Entre los robots de gama pesada representa la alternativa con mayor rigidez de la gama de ABB, lo que permite un menor error en las trayectorias de mecanizado con la consiguiente mejora en la precisión y los acabados superficiales de las piezas mecanizadas. Los robots ABB ofrecen un versión “*Foundry plus*”, que es un acabado especial con protección IP 67, adecuado para el uso en ambientes agresivos; impide la penetración de la humedad o virutas en las cavidades y presentan una protección especial del cableado y la electrónica.



Ilustración 2.38 Robot IRB 6660- 205/1.9

Las principales CARACTERÍSTICAS geométricas del robot IRB 6660 - 205/1.9 se representan en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.imagen**.

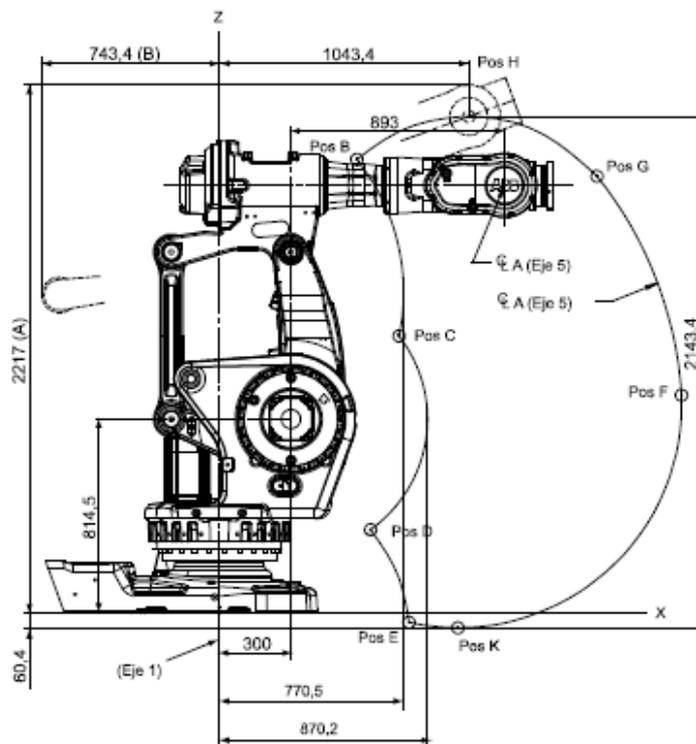


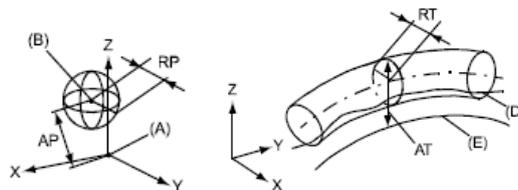
Ilustración 2.39 Área trabajo del robot IRB 6660- 205/1.9

Las principales características son

- Número de ejes: 6.

- Par en la muñeca eje 6 de 620Nm.
- Capacidad de sobrecarga, en todas las variantes, 15 kg en la parte superior del brazo y de 500 kg en el marco del eje 1.
- Protección: Robot completo IP 67.
- Montaje en piso.
- Temperatura ambiente de la unidad mecánica: Funcionamiento de +5 a 50 ° C.
- Temperatura de Transporte/almacenamiento de -25 a 55 ° C, Períodos cortos (máx 24h) hasta +70 ° C.
- Humedad relativa máx. 95%.
- Nivel sonoro máximo 70-73 dB (A).
- Doble circuitos de seguridad con la supervisión, paradas de emergencia y funciones de seguridad, 3 posiciones permitidas.
- Emisión de EMC / EMI-blindado.
- Tensión de alimentación 200-600 V, 50/60 Hz.
- Consumo de energía ISO-Cube 3,6 kW.

La norma ISO 9283 es parte de una serie de normas internacionales que de facilitar el entendimiento entre usuarios y fabricantes de robots, definiendo las principales características de funcionamiento, especificaciones y recomendaciones sobre los tests de ensayo. Con el propósito de cuantificar la precisión y repetibilidad del robot para posicionarse en un punto, o de seguir una trayectoria predefinida, se realiza un ensayo a la carga nominal máxima, al desplazamiento máximo y una velocidad de 1,6 m/s en el plano de pruebas ISO inclinado. Se usa para el ensayo un cubo de 1 metro y los seis ejes en movimiento. Las cifras para AP, RP, AT y RT se miden de acuerdo con la **Ilustración 2.40**.



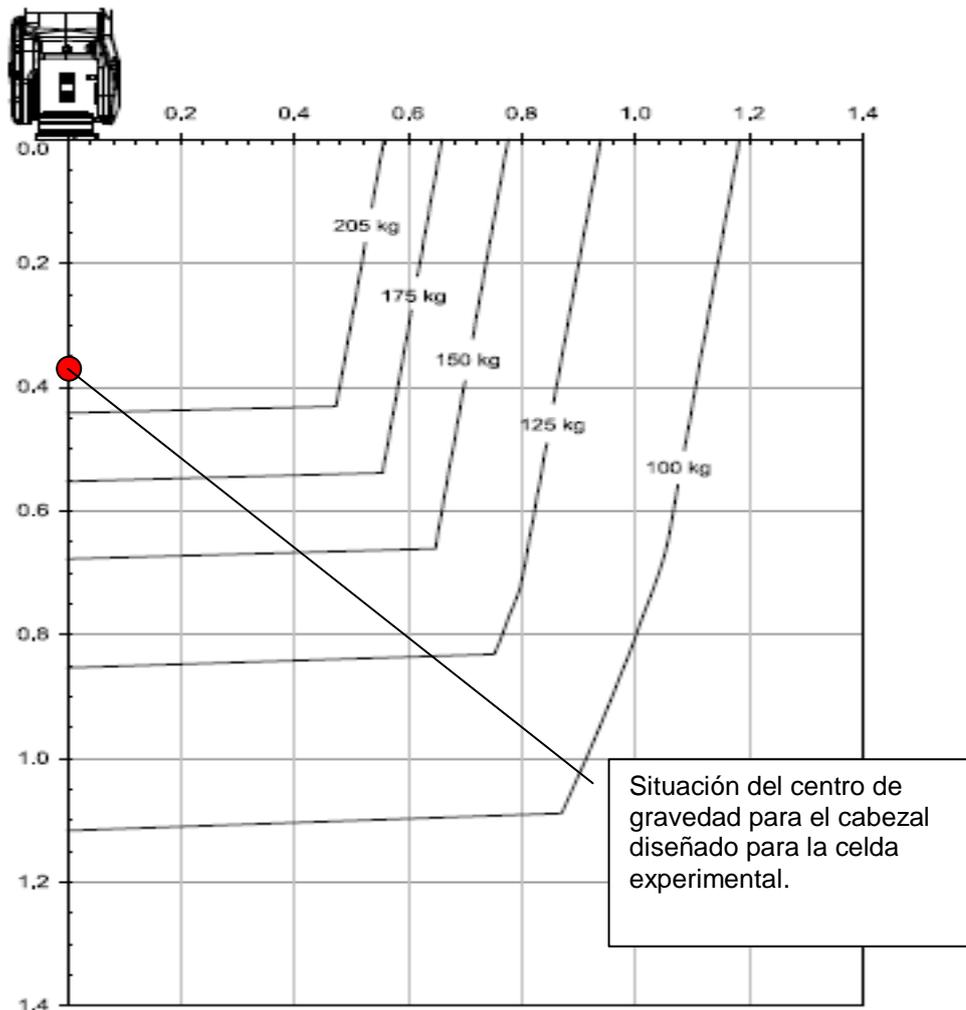
Pos	Descripción	Pos	Descripción
A	Posición programada	E	Trayectoria programada
B	Posición media durante la ejecución del programa	D	Trayectoria actual durante la ejecución del programa
AP	Distancia media desde la posición programada	AT	Desviación máxima desde E
RP	Tolerancia de la posición B en caso de posicionamiento repetido	RT	Tolerancia de la trayectoria con la ejecución repetida del programa

IRB 6660	130/3.1	205/1-9
Exactitud de pose, AP* (mm)	0.05	0.15
Repetibilidad de pose, RP (mm)	0.11	0.07
Exactitud de trayectoria, AT (mm)	1.88	0.12
Repetibilidad de trayectoria, RT (mm)	0.88	0.61

**Ilustración 2.40** Característica de movimiento del robot según ISO

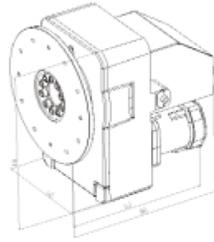
Los valores anteriores indican un rango de resultados medios de las pruebas realizadas con el robot, lo que sirve para definir el área de trabajo y posicionamiento de la unidad rotatoria o mesa de trabajo

Las cargas debidas al cabezal que soporta el brazo robot, definidas en **la Ilustración 2.37, y** en función de la separación entre el mandrino de mecanizado y el "Tool 0", se representan en la siguiente gráfica. Se sitúa el centro de gravedad del cabezal de mecanizado tal y como se ve en las siguientes gráficas.



**Ilustración 2.41 Carga máxima admitida según posición de CG del caabezal de mecanizado**

Para el diseño de la mesa se ha requerido un área de trabajo de  $1 \text{ m}^2$ , correspondiente al área de trabajo calibrada según norma ISO, y un peso de 1.000 Kg máximo por pieza. Según estas especificaciones se ha procedido a seleccionar el posicionador y el diseño del sistema de amarre que mejor rigidice la mesa sobre la que situará las probetas a ensayar. Se han barajado diferentes posibilidades, pero el empleo del Robot condiciona la selección de la misma. ABB dispone de unidades rotativas completamente integradas con sus robots. La selección de cualquier otro tipo de mesa obligaría a asumir riesgos de integración innecesarios y limitaciones finales del sistema.



	MTC			
	A	B	C	D
250	250	378	337	364
500	354	540	479	496
750	354	540	479	496
2000	415	612	567	606
5000	580	810	771	788

	Unit	MTC 250	MTC 500	MTC 750	MTC 2000	MTC 5000
Handling capacity	kg	250	500	750	2000	5000
Cont. torque	Nm	350	650	900	3800	9000
Max inertia	kgm <sup>2</sup>	40	170	300	1200	3500
Max bending torque	Nm	650	3300	5000	25000	60000
Max speed	rpm	30	25	25	15	6.5
Max acc	rad/s <sup>2</sup>	3.8	2.5	2.0	0.7	0.6
Repeatability r=500	mm	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
0 – 45 deg reorient	sec	1.1	1.4	1.5	2.3	2.5
0 – 90 deg reorient	sec	1.4	1.8	2.1	3.2	3.7
0 – 180 deg reorient	sec	2.0	2.5	2.8	4.4	6.0
0 – 360 deg reorient	sec	3.0	3.6	4.1	6.4	10.9
Emergency stop time	sec	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.6	< 0.9
Weight	kg	70	169	172	340	772

#### Ilustración 2.42 Mesa rotativa MTC 2000

Se ha proyectado un posicionador MTC 2000 de único eje, que al misma marca que el robot ABB, se puede programar e integrar completamente como eje externo del robot. Las especificaciones técnicas son:

- Carga Máxima: 2.000Kg
- Par: 3.800 Nm
- Inercia Máxima: 1.200 Kgm<sup>2</sup>
- Velocidad Máxima: 15 rpm
- Aceleración Máxima: 0.7 rad/s<sup>2</sup>
- Repetibilidad: 0.1 mm
- Peso: 340 Kg

Por lo tanto, para el montaje de la celda automatizada se ha decidido emplear la unidad de rotación de ABB, vista en la **Ilustración 2.42**, por presentar especificaciones técnicas adecuadas y ser compatible con el sistema de control del robot. La controladora **IRC5** de ABB, como la que se muestra en la **Ilustración 2.43**, se encarga de ejecutar los programas de mecanizado así como del control de todos los equipos auxiliares del robot, incluido el cabezal de mecanizado.



Ilustración 2.43 Controladora IRC5

### 3.1.2. Selección del electrohusillo de mecanizado

Existen electro-husillos con diferentes morfologías constructivas en función de las aplicaciones a resolver. Para el caso que nos ocupa, y en función de los parámetros de mecanizado objeto de análisis en este trabajo, se han evaluado electro husillos que garantice el correcto funcionamiento para la potencia seleccionada y los rangos de velocidades marcados. Tras evaluar minuciosamente las características técnicas de las diferentes opciones, se ha decidido adquirir el electro husillo **PERON SPEED PS TCV-1-SP** como el de **Ilustración 2.44**.

VELOCITA'	RPM	6000	10000	15000	24000
FRECUENZA	Hz	208	343	520	800
POTENZA (S1)	KW	9	15	15	15
COPPIA (S1)	Nm	14	14	10	6
TENSIONE	v	152	250	380	380
CORRENTE	A	53	53	41	38

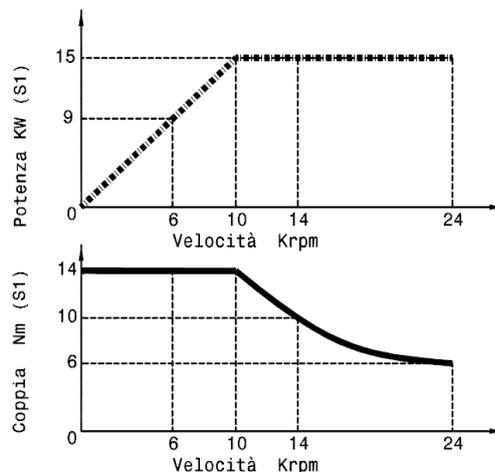


Ilustración 2.44 Electrohusillo PERON SPEED PS TCV 1 SP

Como complemento del cabezal de mecanizado se ha requerido diseñar, calcular, fabricar e instalar un equipo para integrar y controlar el electromandrino **HF** tipo **PS-TCV-1**,

**PERON SPEED.** El equipo está montado en un armario y este consta de los siguientes dispositivos a integrar para su correcto funcionamiento:

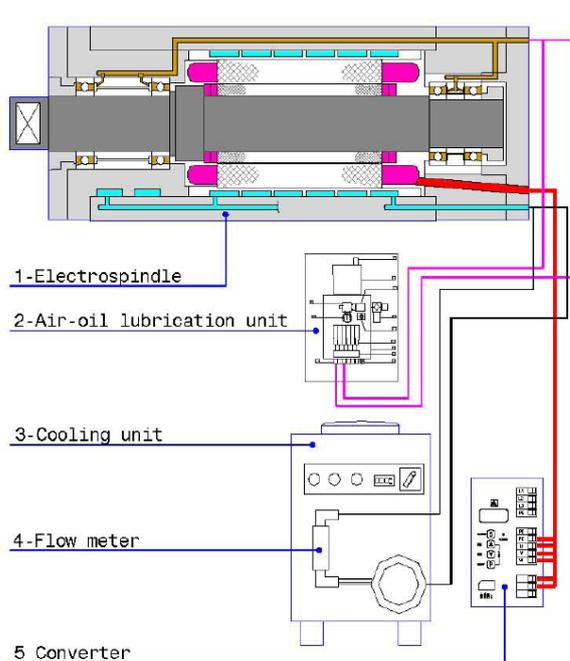
- Equipo de refrigeración **EURO COLD MOD. ACW-LP-45**, para mantener temperatura del fluido refrigerante se mantenga a **22±2°C** y así, evitar tensiones y deformaciones estructurales que reduzcan la vida y la precisión del electrohusillo.
- Grupo/Circuito neumático para presurización interior(1-1.5bar) soplado/limpieza(4-6bar) de cono portaherramientas y lubrorefrigeración de la herramienta/pieza mediante aire, dicho grupo realiza las siguientes funciones:
  1. Mantener constantemente limpio, libre de impurezas como polvo y agua.
  2. Lograr una buena lubricación del equipo.
  3. Mantener una presión constante en el interior del dispositivo lo cual
- Grupo/Circuito hidráulico para realizar la apertura de pinza con una presión de trabajo de 50 bar.
- Alimentación del mandrino mediante convertidor de frecuencia SP3401 que permitirá variar las velocidades de trabajo del mandrino.
- Cabecera profibus para las señales de control de la pinza de amarre de la herramienta, para encoder incremental, control de sensor **KTY, PT 100**, etc.

Para controlar todos estos dispositivos se ha montado un cuadro eléctrico donde van integrados todos los componentes necesarios para dicho fin. Este cuadro permite controlar la utilización del electromandrino en modo manual o automático mediante un selector. En modo automático los diferentes dispositivos son controlados a través de la controladora IRC5 del robot a través de la cabecera **Beckhoff BK3150 Profibus** con sus módulos correspondientes. En modo manual los dispositivos funcionan de manera independiente de la controladora del robot, mediante pulsadores destinados a tal efecto.

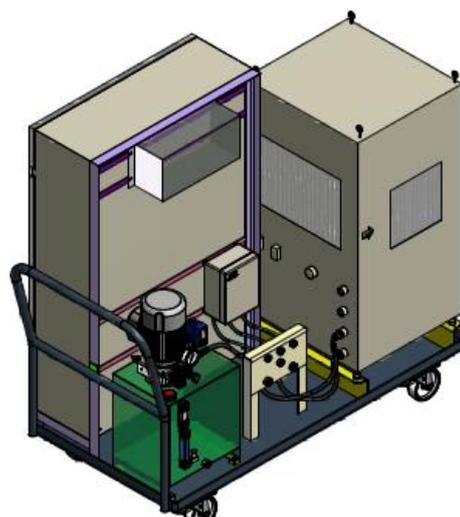
El cuadro eléctrico debe ir perfectamente cableado, y provisto de todos los elementos necesarios para alimentar al electromandrino con los siguientes elementos.

Referencia	Descripción
<b>SP3401</b>	Unidrive SP N.D.(18,5Kw/35A) H.D. (15Kw/30A)
<b>SM-Profibus</b>	Módulo de comunicación PROFIBUS
<b>RE/PR20R-2000W</b>	Resistencia de frenado para Unidrive SP

El armario esta, además, provisto de todos los elementos necesarios como protecciones, elementos de alimentación, seta de emergencia, cableado, etc. Su estructura y configuración se contemplan en las siguientes figuras.



**Ilustración 2.45 Configuración de los elementos del armario de control electrohusillo**



**Ilustración 2.46 Estructura del armario de control electrohusillo**

El análisis y evaluación realizadas han sido muy importantes para la investigación realizada, puesto que han definido las directrices a seguir en el diseño del prototipo, representando una parte fundamental y que **ha permitido aplicar los experimentos definidos y las metodologías de diseño de equipos de mecanizado robotizado expuestas.**

### 3.1.3. Integración de la celda experimental

En primer lugar, se ha procedido a la adquisición de elementos estándar por tratarse de componentes con plazo de entrega largo, en torno a las 12 semanas, en este sentido cabe destacar el robot de manipulación, la unidad rotativa y el electro husillo. De forma paralela, se ha procedido a la fabricación de elementos no estándar; peana soporte del robot, unidad rotativa y soporte del electro husillo. La fabricación del equipo comprende tanto la integración de los equipos y sistemas estándar, como la fabricación de una estructura portante para el mismo.

Se han realizado las tareas de montaje del prototipo, se ha instalado el robot sobre la peana y la unidad rotativa sobre el soporte dispuesto. Además, se ha instalado el electro husillo en la mano del robot, empleando el soporte fabricado a tal efecto. El montaje final del prototipo se muestra en la siguiente figura.



**Ilustración 2.47 Montaje real del prototipo**

Y por último se han dispuesto las conexiones y cableado correspondiente desde el equipo complementario del electro husillo hasta la mano del robot. La manguera corrugada dispuesta se monta sobre los soportes del robot, albergando en su interior: cable de potencia alimentación electro husillo, cable de señales, cable encoder, conductos neumáticos y conductos de refrigeración.

Tras integrar los componentes, tanto elementos comerciales como elementos de fabricación no estándar, se procede a describir los elementos de control y comunicación. La controladora **IRC 5** de ABB se encarga de supervisar y controlar todos los órganos de la celda. Por un lado, controla las unidades mecánicas de ABB, robot y unidad rotativa, además se encarga de supervisar el equipo complementario del electro husillo. La ejecución de los programas de mecanizado se efectúan desde esta unidad. Se dispone de una red **Profibus** para comunicación de todos los dispositivos de la celda. El autómatas de seguridad integrado se encarga de supervisar el estado de la controladora IRC5, la puerta de acceso y las señales de marcha, paro, habilitado y parada de emergencia.

Para lograr la integración completa del sistema robotizado se ha procedido a la elaboración del programa encargado de controlar los distintos equipos descritos. Por un lado se ha programado el control central del sistema, capaz de leer el estado de todas la señales y accionar los elementos móviles del sistema. La controladora se encarga de supervisar el estado del electro husillo y su equipo complementario (apertura de la pinza, refrigeración, variador de frecuencia, soplado de herramienta, etc). El programa de mecanizado de las piezas a fabricar discurre en modo multitarea en paralelo. También es la encargada de realizar el cambio de herramienta mediante otra tarea en paralelo, siempre indicada por el programa principal de mecanizado.

A su vez, el sistema de control principal es supervisado por el autómatas de seguridad previsto, encargado a su vez de comprobar el estado de los elementos de seguridad y los accesos a la celda.

### 3.2. Método calibración de TCP robot y wobj mesa

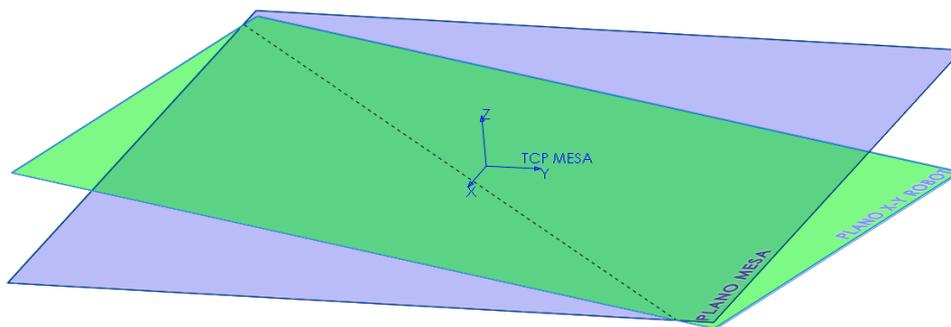
Primeramente y antes de la aplicación de una metodología para la determinación de la rigidez del sistema, se debe realizar una calibración del conjunto Robot/Mesa de la celda para que los sistemas de coordenadas de todos los elementos se muevan en función de un único sistema de referencia y así los resultados de posición y de trayectorias del conjunto Robot/Mesa correctos.

Para que la CELDA ROBOTIZADA permita mecanizar piezas de dimensiones y morfologías variadas sin la necesidad de recalibrar el sistema en cada una de ellas es necesario conocer, mediante un método iterativo, la posición real del *TCP* y del *Wobj* respecto a los ejes del universo (base robot). Para realizar esta calibración se han aproximado los planos virtuales, tanto del husillo como de la mesa, a los reales reorientándolos para que una vez se encuentren coincidentes, poder saber en qué posición se encuentra un objeto situado sobre la mesa.

- Como paso inicial, se ha hecho coincidir los ejes de la base del robot con los ejes del *TCP* del husillo realizando los ajustes necesarios con la controladora del robot.
- Para que el *Wobj* (en los gráficos llamado A) esté perfectamente definido se necesita conocer los valores de X,Z,Y del centro de la mesa y los ángulos  $\alpha, \beta, \gamma$  que forman los ejes reales de la mesa con los ejes del universo (en referencia a la base del robot).

#### 1. Determinación de **ORIENTACIONES** de ejes

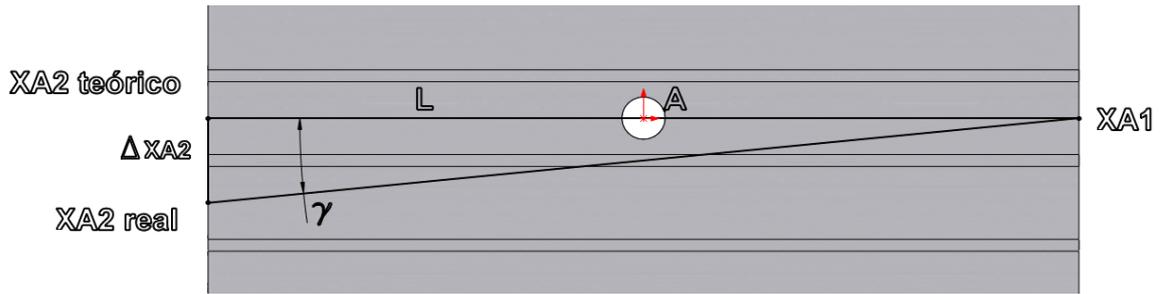
Primeramente se precisa orientar los ejes virtuales del universo con los reales de la mesa, puesto que estos no se encuentran coplanarios tal y como se puede ver en la **Ilustración 2.48**.



**Ilustración 2.48 Orientación inicial de los planos Robot/Mesa.**

Para realizar este procedimiento se ha comenzado poniendo el contador de vueltas de la mesa a 0 para poner en supuesta coincidencia los ejes "X" e "Y" virtuales con los reales. Posteriormente se ha acoplado un reloj comparador al electro husillo con la ayuda de un soporte magnético y se ha calibrado para que al girar el brazo soporte del reloj, este gire alrededor del mismo punto, evitando así errores en la calibración del *Wobj* de la mesa. Una vez realizado esto, se han tomado dos puntos de la mesa cuyo segmento de unión pasase por el centro de esta y se ha medido la diferencia entre el punto final teórico y el real, y se ha calculado el ángulo de desviación  $\sigma$  (en torno al eje "Z") del plano "XY" para compensarlo con las funciones del controlador. Tras conocer los datos de desviación se ha girado la mesa hasta

hacer coincidentes el eje "X" del husillo con el de la mesa. Este procedimiento se visualiza en la **Ilustración 2.49**.

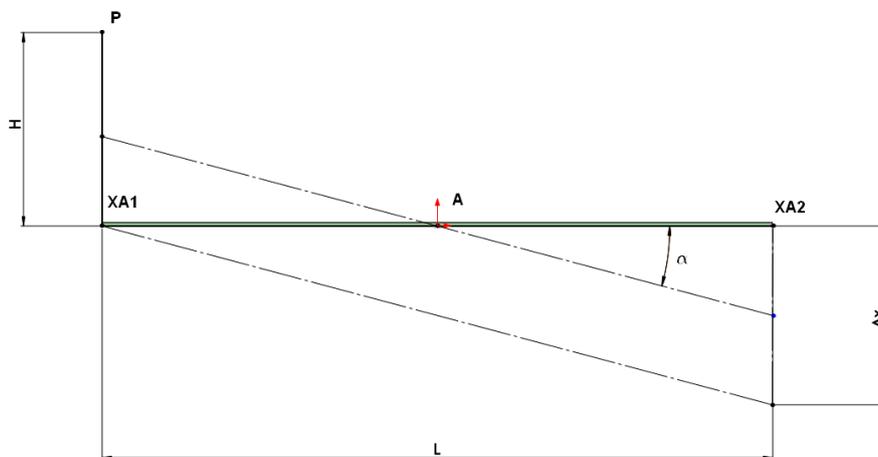


**Ilustración 2.49 Calibración eje "XY" en torno a "Z"**

$\Delta_{XA2}(\text{mm})$	L(mm)	Tang	g (radianes)	g (grados)
43,66	1000	0,0437	0,0436	2,50

A continuación han medido y corregido las desviaciones  $a$  y  $b$  del plano "XY" de la mesa respecto al virtual (en torno al eje "Y" y al eje "X") conociendo la distancia entre dos puntos y la diferencia en "Z" entre dichos puntos medida mediante el reloj comparador. La magnitud a corregir en cada medición ha sido la mitad de la diferencia de altura entre los dos puntos (en sentido contrario al obtenido) hasta hacer coincidir los ejes "X" e "Y" virtuales con los reales de la mesa o a obtener valores de desviación en torno a  $0^\circ$ . El procedimiento descrito se puede ver en la **Ilustración 2.50** y en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y los datos obtenidos en la **Tabla 2.5** y **Tabla 2.6**.

**EN TORNO AL EJE Y**



**Ilustración 2.50 Calibración eje "X" en torno a "Y"**

$$\text{Tan}\alpha = \Delta x / L \rightarrow \alpha = \arctan(\Delta x / L)$$

Medición	Ax(mm)	L(mm)	Tana	a(radianes)	a(grados)
1	-4,9	1000	-0,00490	-0,00490	-0,28075
2	-0,225	1000	-0,00023	-0,00022	-0,01289
3	-0,02	1000	-0,00002	-0,00002	-0,0025

Tabla 2.5 Resultados de las orientaciones en torno al eje "Y"

EN TORNO AL EJE X

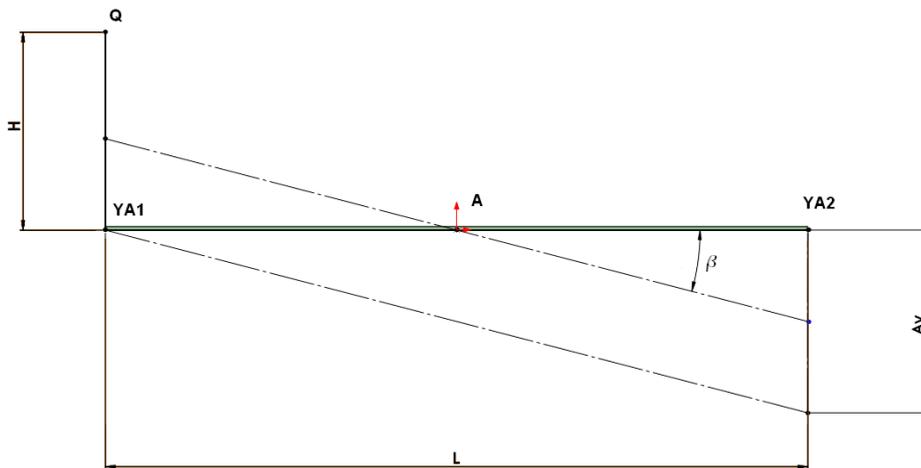


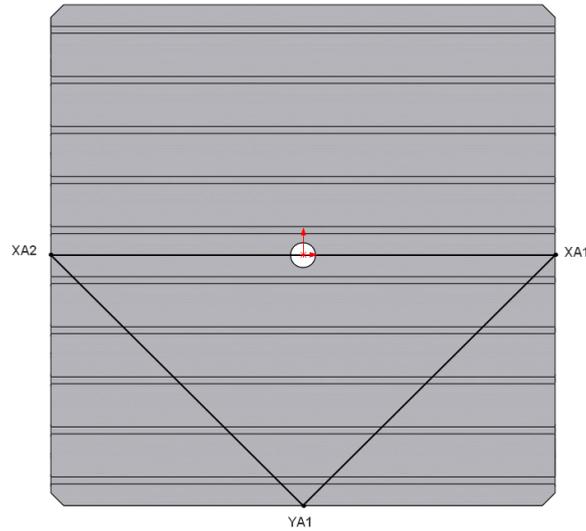
Ilustración 2.51 Calibración eje "Y" en torno a "X"

$$\tan \beta = \Delta y / L \rightarrow \beta = \arctan(\Delta y / L)$$

Medición	Ay(mm)	L(mm)	Tanb	b(radianes)	b(grados)
1	2,327	1000	0,00233	0,00233	0,13333
2	-0,124	1000	-0,00012	-0,00012	-0,00710
3	-0,025	1000	-0,00003	-0,00002	-0,00143

Tabla 2.6 Resultados de las orientaciones en torno al eje "X"

Por último, una vez orientados los planos virtuales con los reales de la mesa, se ha registrado un tercer punto de esta, para terminar de concretar el "Work Object" representado en la **Ilustración 2.52** y definido por los siguientes parámetros.



**Ilustración 2.52 Wobj de la mesa**

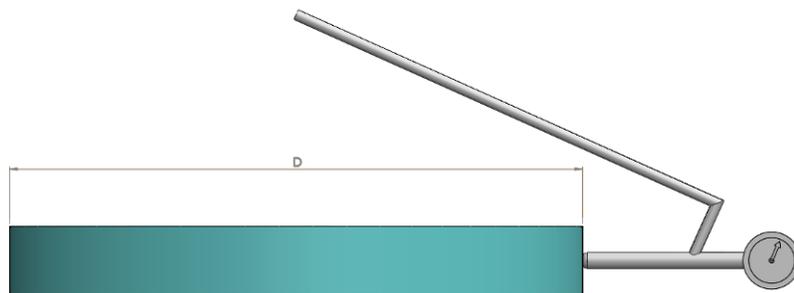
### **Wobj**

Posición  $[x,y,z]=[98.076,1795.91,97.8]$

Orientación  $[\text{Roll,Pitch,Yaw}]=[0.0591, -0.0648, -0.2505]$

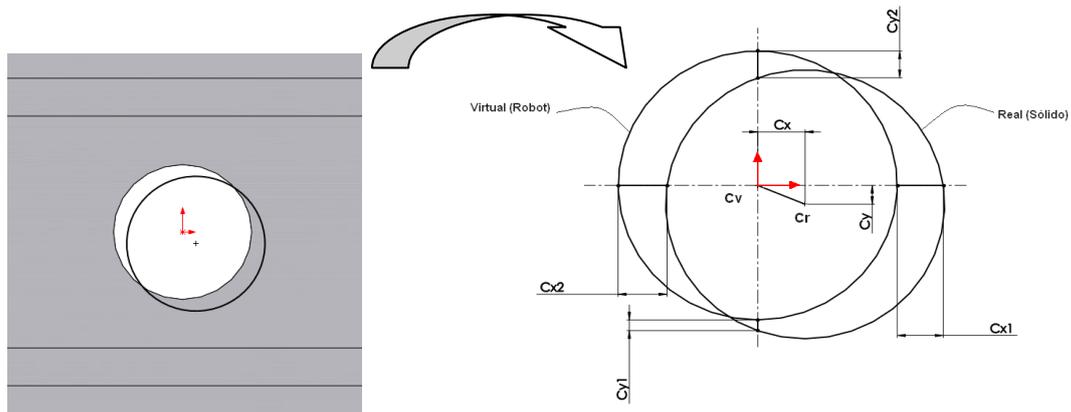
#### 2. Determinación del centro de la mesa

Para continuar con la calibración del *Wobj* de la mesa, se ha procedido a recorrer el perímetro de un plato de calibración (previamente diseñado con tal fin) con un reloj comparador, tal y como se muestra en la **Ilustración 2.53**, para ver cuanta desviación existente en “X” y en “Y” entre el eje “Z” del TCP de la herramienta y el eje “Z” de la mesa para conseguir situarlos concéntricos.



**Ilustración 2.53 Esquema plano calibrado/reloj comparador**

Esta operación se ha realizado primero para el eje “X” y después para el eje “Y” (el orden es indiferente). Con la desviación que muestra el reloj comparador se ha procedido a realizar la corrección realizando el cálculo que se muestra en la siguiente figura.



**Ilustración 2.54 Posición del eje Z del TCP husillo respecto al eje Z de la mesa**

En cada vuelta realizada con el reloj comparador se ha tenido que mover el robot el valor “Cx” o “Cy” (dependiendo de qué coordenada estemos calibrando) hasta conseguir que el reloj marcara una diferencia lo más próxima al 0. Una vez conseguido esto, se han terminado de alinear los ejes “Z” de la herramienta y de la mesa. El procedimiento de recogida de datos y cálculo para proceder a realizar las correcciones pertinentes se muestran en las siguientes tablas.

**Eje X**

Medición	Cx1(mm)	Cx2(mm)	Cx(mm)
1	0,008	-0,191	-0,0915
2	0,001	0	0,0005

**Tabla 2.7 Desviaciones del eje "X"**

**Eje Y**

Medición	Cy1(mm)	Cy2(mm)	Cy(mm)
1	0,007	-0,066	-0,0295
2	0,002	-0,065	-0,0315
3	0	-0,03	-0,015

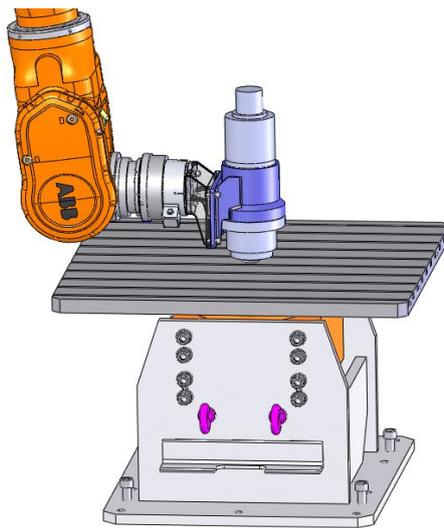
**Tabla 2.8 Desviaciones en el eje "Y"**

En el eje “X” se puede comprobar mediante los datos recogidos que se ha conseguido una alineación de los ejes con un error de media milésima de milímetro, lo cual es un ajuste casi perfecto.

En cambio en el eje “Y” se ve como tras una primera medición y posterior corrección, no se ha logrado mejorar la alineación de los ejes, sin embargo realizando unas correcciones de la posición del robot y tras una tercera medición se puede observar como se ha conseguido una precisión de 15 centésimas de milímetro, considerando este valor como aceptable. El principal problema a la hora de ajustar más las alineaciones es la capacidad de los motores del robot de realizar movimientos de fracciones de milímetro.

### 3. Determinación de la posición de la mesa en altura

Una vez alineados los centros del husillo y el de la mesa, se ha hecho descender el plano “XY” del mandrino hasta situarlo coplanario con el plano “XY” de la mesa, tal y como se contempla en la **Ilustración 2.55**, y así determinar la altura de ese punto de contacto entre planos respecto a la base del robot, ya que todos los movimientos irán referenciados a su base. En esta configuración de la celda, se ha obtenido una altura en “Z” de 97,8mm.



**Ilustración 2.55** Altura plano XY husillo respecto al XY mesa

# CAPÍTULO III: VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA DESARROLLADA

## 4. Validación del método de calibración de la celda

Cuando el usuario de la CMR quiera llevar a cabo el mecanizado de una pieza, es indispensable disponer de un equipo perfectamente calibrado para una correcta ejecución de la operación, con precisión y acabado superficial adecuados. Dicho lo cual, en este caso, se ha desarrollado un ensayo de contorneado de una pieza de prueba con el fin de realizar una serie de comprobaciones que permiten validar la calibración del TCP y el WOBJ, tan necesarios para garantizar la correcta ejecución de los posteriores ensayos.

En primer lugar se ha definido y calibrado el TCP de la herramienta (posición de la punta de la herramienta respecto el Tool 0 del robot) es un factor determinante para obtener una precisión de mecanizado adecuada, por lo que se realizaron mediciones micrométrica del cabezal de mecanizado. Para ello se ha empleado una máquina de medición tridimensional.

Posición respecto Tool 0 en mm (x,y,z)	Ángulos de Euler (Rx,Ry,Rz)
212,51	89,92
-0,76	0
279,06	-89,90

**Tabla 3.9 Definición del TPC.**

Otro ajuste importante para aumentar la precisión del robot es determinar las cargas e inercias de la herramienta de mecanizado. La controladora del robot incorpora una aplicación llamada "LoadIdentify" que permite calcular dichos valores y ajustarlos con una precisión del 99% mediante una serie de iteraciones. Los valores obtenidos y ajustados son los siguientes.

Peso (Kg)	Centro de gravedad en mm (x,y,z)	Momento de Inercia (x,y,z)
	-5,71	0,932
78,7	0,30	3,121
	225,38	1,434

**Tabla 3.10 Cargas e inercias del cabezal de mecanizado.**

También se ha realizado el ajuste del eje externo dispuesto calculando el WOBJ mesa mediante el procedimiento descrito en el capítulo II del presente documento. El resultados obtenido es el siguiente.

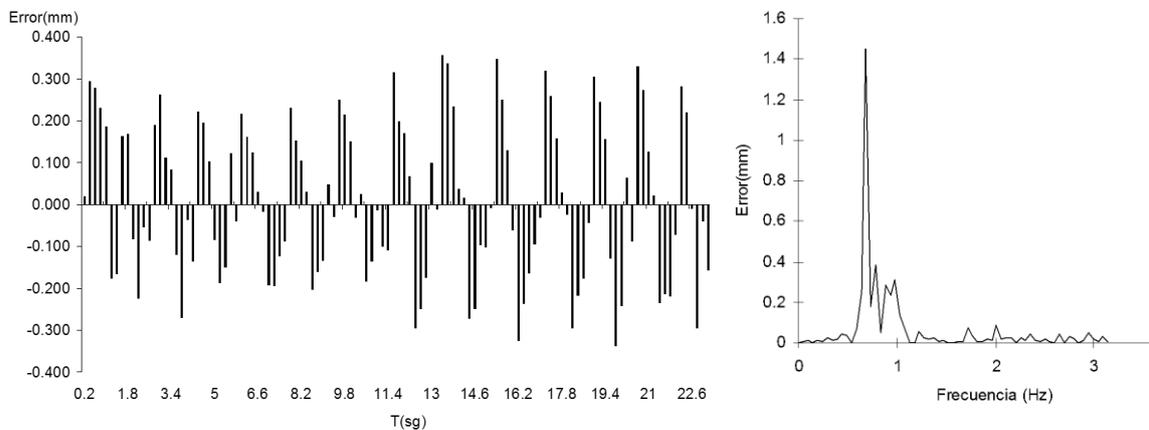
Posición del centro de la mesa en mm (x,y,z)	Ángulos de Euler (Rx,Ry,Rz)
198,07	0,06
1.893,98	-0,06
119,91	-0,25

**Tabla 3.11 Posición del WOBJ mesa.**

Para ello se ideado un dispositivo de ajuste mecánico con resolución de una milésimas, reloj comparador, que dispuesto sobre el robot permite realizar diversas mediciones hasta determinar la posición y orientación de la mesa de trabajo. Este ajuste ha permitido lograr una

precisión de  $\pm 0,6$  mm, cuando el sistema trabaja con la mesa como eje independiente y coordinada.

La lectura y ajuste de encoders tiene por objetivo principal obtener las posiciones reales de la herramienta, mediante la adquisición de la lectura de los encoders de los ejes accionados durante la ejecución de trayectorias de mecanizado. La controladora del robot (IRC5) incorpora instrucciones que transforman la información de los encoders en coordenadas cartesianas, cinemática inversa. De esta manera, podemos determinar el error cometido por el robot entre la trayectoria ideal y la real, como muestra la figura siguiente.

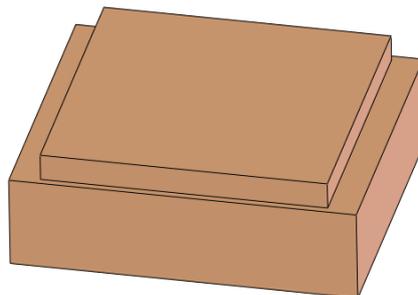


**Ilustración 3.56 Lectura de encoders robot y espectro de frecuencias error en trayectoria.**

A partir de los datos obtenidos se represento el espectro de frecuencias del error en trayectoria, observando que se produce un incremento elevado del error en la frecuencia de 0.6 Hz. De esta manera es posible optimizar el sistema robotizado partiendo de los datos obtenidos de los encoders. Por lo tanto, sigue existiendo una pequeña diferencia entre los valores proporcionados por los encoders y los valores reales, podemos determinar la amplitud del error de la maquina con bastante garantía y previa ejecución de pruebas de mecanizado.

## 4.1. Diseño de la pieza de prueba y material

Una vez definida la operación a realizar, contorneado, para verificar el ajuste de la CMR, se ha decidido llevar a cabo una prueba de contorneado de base cuadrada en espuma de poliuretano. En este ensayo queremos evaluar exclusivamente la precisión de movimientos de la CMR sin considerar la interacción de las propiedades mecánicas de la estructura con el proceso de corte. La morfología de la pieza se contempla en la siguiente figura.



**Ilustración 3.57 Diseño CAD de la pieza de pruebas**

El material seleccionado es espuma rígida de poliuretano (PUR) de alta densidad HD-2.

Propiedades	HD-1	HD-2	HD-3	HD-4
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	130-180	220-280	310-390	400-500
Resistencia a la compresión (kPa)	1200	3000	5500	8500
Coef, conductividad térmica (W/m·K)	0.035	0.042	0.048	0.058

Tabla 3.12 Propiedades físicas del PUR.

## 4.2. Herramientas de corte utilizadas

Para ejecutar la prueba de mecanizado se han utilizado una serie de utillajes y herramientas que han permitido ubicar la pieza en el área de trabajo y la ejecución de la operación de conformado anteriormente descrita. Por un lado tenemos el utillaje de sujeción que ha permitido ubicar el material en la mesa de conformado como se muestra en la imagen.



Ilustración 3.58 Posicionado del material en la mordaza.

Para la ejecución del conformado, se ha dispuesto de una serie de herramientas de corte que han permitido llevar a cabo todas las morfologías diseñadas. Las herramientas disponibles se muestran en la siguiente tabla.

Herramienta	Ø(mm)	L <sub>herramienta</sub> (mm)
KENDU 204.60 D10x22x150	10	150,5
KENDU 903.60 D10x22x150 R5	10	150,5
KENDU 204.60 D16x32x150	16	151,5
KENDU 903.60 D16x32x150 R8	16	151,5
SANDVIK R390-020A20L 11L	20	90,5

Tabla 3.13 Herramientas de Corte.

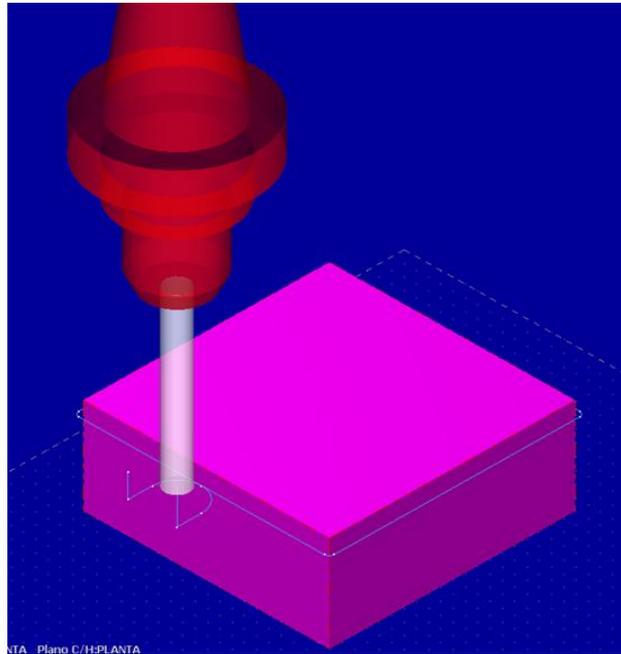
## 4.3. Estrategias de corte y programación CAM

Con el diseño de la pieza de pruebas concluido, se ha procedido a estudiar las diferentes estrategias de corte de las figuras con el software Mastercam, estudiando primero las opciones disponibles y seleccionando posteriormente la que más se adapte a la operación que se quiera llevar a cabo. En esta prueba se ha empleado una herramienta plana de Ø10,

doble filo y fabricada en metal duro. Las entradas de la herramienta se han realizado de forma tangencial aunque debido a la propiedades mecánicas de la espuma, se podrían haber realizado entrada frontal.

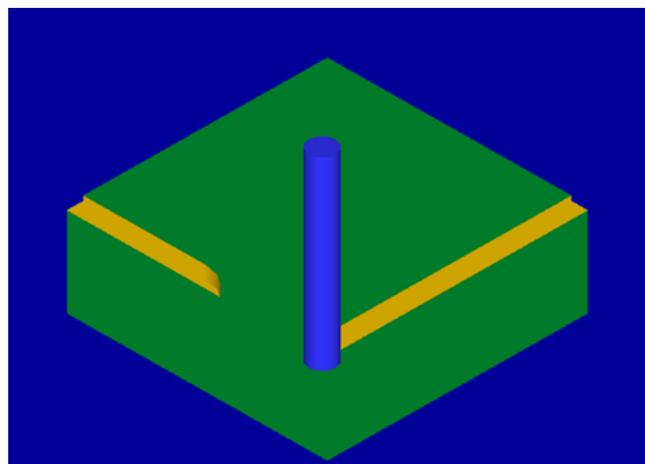
#### 4.3.1. **Contorneado común**

Una de las estrategias que se ha estudiado para ejecutar el mecanizado de la figura que se ha diseñado, fue el contorneado lineal de la morfología prismática a lo largo de una única trayectoria de corte y en una sola pasada en “Z” constante, como se muestra en la siguiente imagen.



**Ilustración 3.59 Estrategia de contorneado en una trayectoria.**

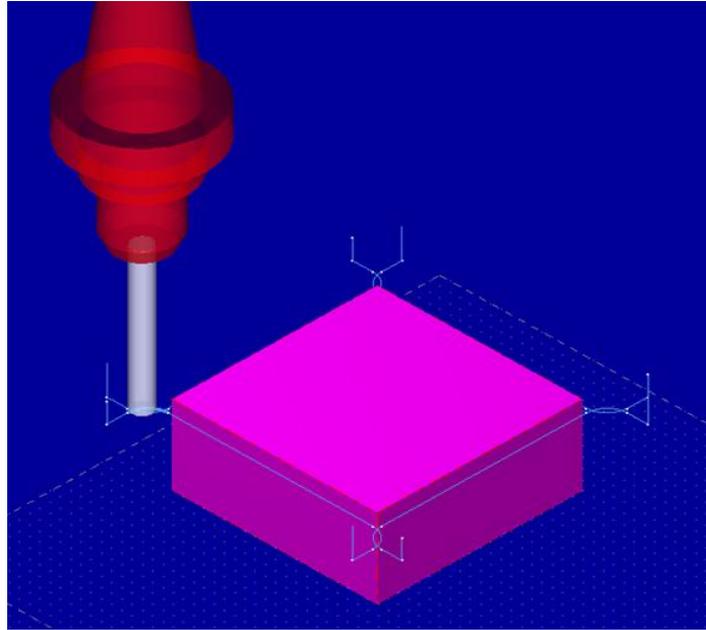
Para la visualización y comprobación de los resultados virtuales de la estrategia de conformado, se ha ejecutado la simulación de esta. Ver **Ilustración 3.60**.



**Ilustración 3.60 Simulación de la estrategia**

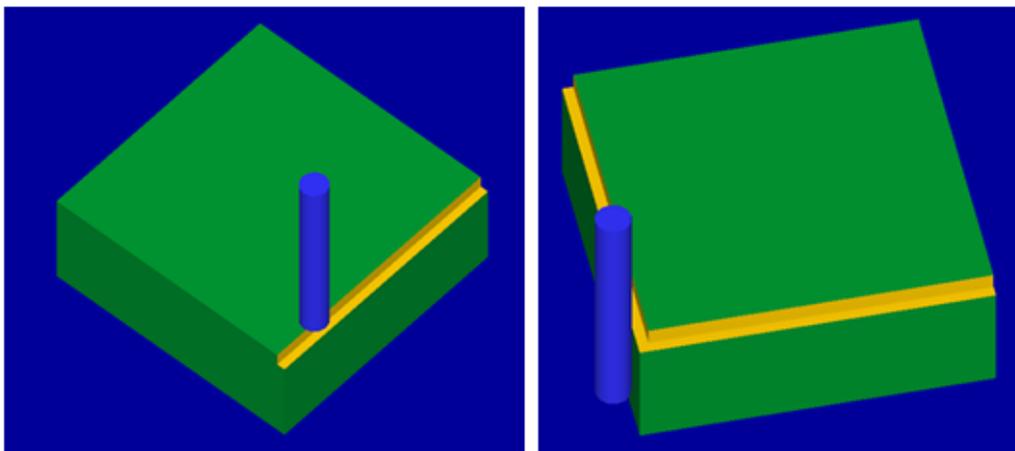
#### 4.3.2. Contorneado discontinuo

La otra estrategia que se ha planteado y que aparece en la **Ilustración 3.61**, consiste en realizar el mismo contorneado lineal del prisma realizando para tal fin cuatro trayectorias impeditas. Se realiza una salida al final de cada trayectoria, un reposicionado del TCP y una posterior entrada de cara a ejecutar la siguiente trayectoria.



**Ilustración 3.61** Estrategia de contorneado en cuatro trayectorias.

La imagen del CAM que se contempla en la **Ilustración 3.62**, describe la estrategia de mecanizado seleccionada. Se puede observar en primer instante la pasada inicial y en una segunda imagen la ejecución de la segunda trayectoria.



**Ilustración 3.62** Simulación de la estrategia.

### 4.4. Simulación de las trayectorias

Previo paso a la realización de los ensayos de mecanizado en la CMR, se han procesado las trayectorias en el software **Robotmaster**. Durante lo cual, se han establecido y simulado los tres métodos de trayectorias de conformado anteriormente descritos.

#### 4.4.1. Método 1: Contorneado común

En el primer método que se ve en la **Ilustración 3.63** se realiza el contorneado de la pieza siguiendo una única trayectoria. El único elemento que se mueve para llevar a cabo el mecanizado es el robot. La mesa, durante todo el proceso, permanece en la misma orientación respecto a los ejes del universo.

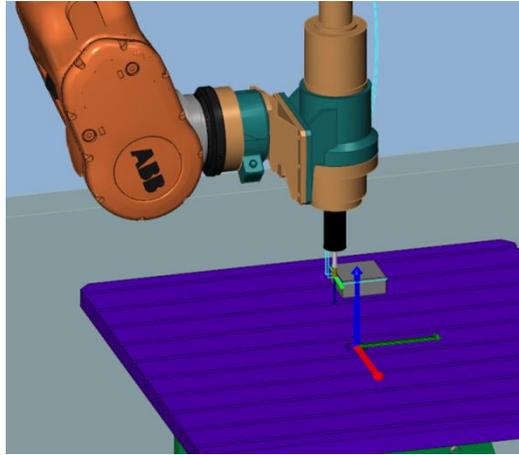


Ilustración 3.63 Simulación del método 1.

#### 4.4.2. Método 2: Contorneado discontinuo

En el segundo método, la mesa posiciona la pieza mediante 4 rotaciones de 90°, y el robot conforma la morfología en trayectorias independientes como muestra la siguiente imagen.

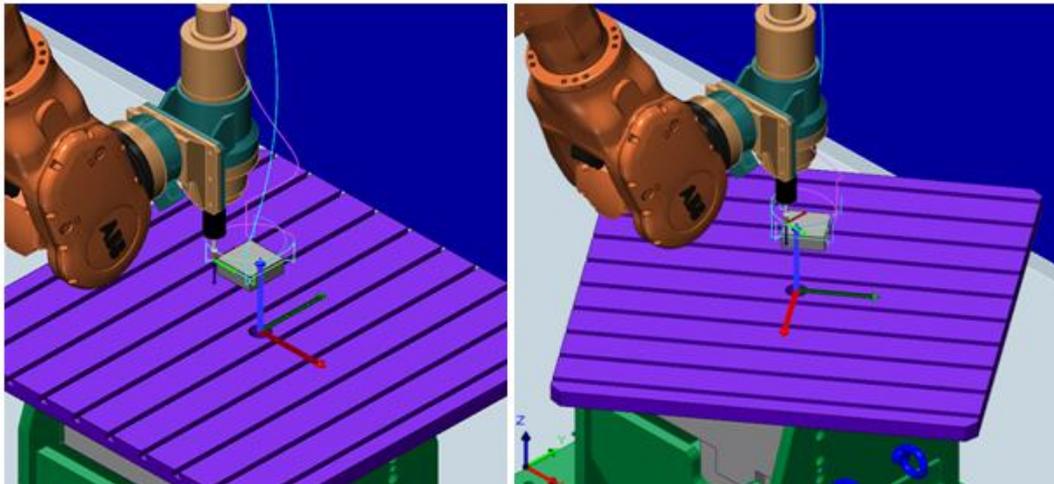
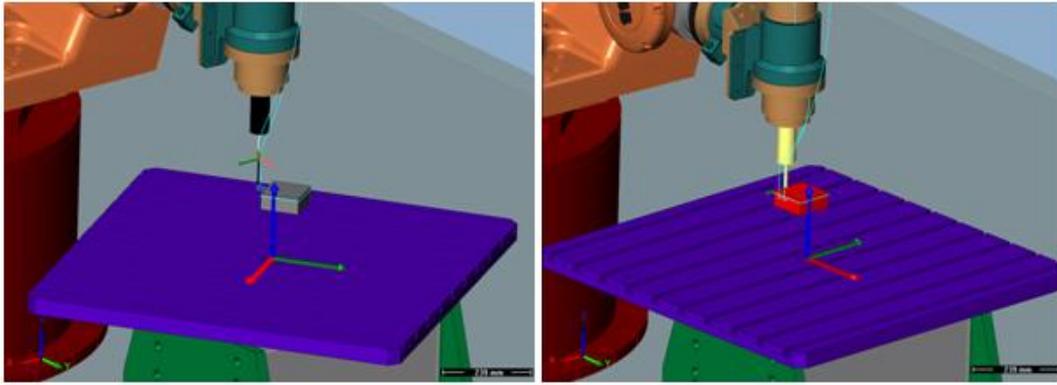


Ilustración 3.64 Simulación del método 2.

#### 4.4.3. Método 3: Contorneado continuo coordinando robot y mesa

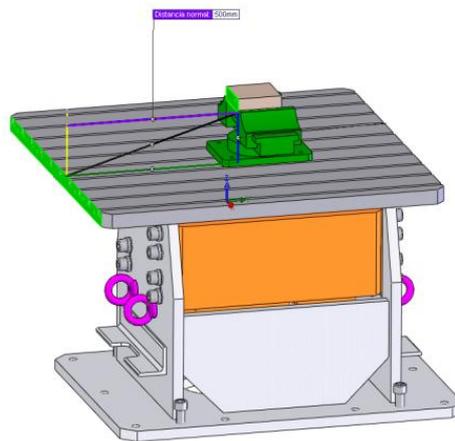
En la **Ilustración 3.65** se observa la tercera metodología, donde se contornea la pieza en una única trayectoria continua, realizando un movimiento coordinado del robot y de la mesa rotativa.



**Ilustración 3.65 Simulación del método 3.**

## 4.5. Prueba de mecanizado

Una vez concluidas las labores de estudio de estrategia, diseño, y simulación de estrategias y trayectorias, se ha procedido a realizar los ensayos programados. El primer paso del desarrollo experimental ha sido comprobar que los ejes del robot y los de la mesa se encontraban alineados (posición inicial). Posteriormente se ha verificado la orientación de la mordaza para que se encontrasen correctamente posicionada respecto a los ejes de su base para así tener el tocho de material bien referenciado respecto al WOBJ mesa. La mordaza sobre la mesa situando las guías de esta en la primera ranura desde el centro de esta en el sentido positivo del eje "X" y a una distancia en el eje "Y" de 0,5 m desde el extremo de la mesa hasta la boca de la mordaza, garantizando la posición exacta de la mordaza en el dentro de la mesa



**Ilustración 3.66 Posicionado de la mordaza y pieza.**

Una vez comprobado que los dispositivos están en la posición de inicio y después de haber posicionado la mordaza y el material, se ha procedido a ejecutar los programas de mecanizado de la pieza diseñada. Primeramente se ha procedido a realizar la prueba por el método 1, a continuación por el método 2 y finalmente se ha ejecutado la prueba del método 3.

En las figuras que se muestran a continuación, se puede contemplar el resultado de las operaciones por los tres métodos.



Ilustración 3.67 Pieza método 1.

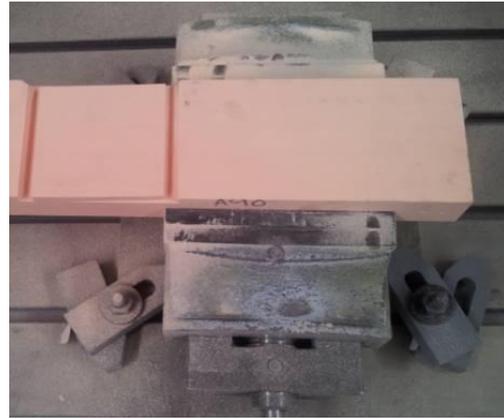


Ilustración 3.68 Pieza método 2.



Ilustración 3.69 Pieza del método 3, Move C.



Ilustración 3.70 Pieza método 3, Move L Z fine.

## 4.6. Mediciones

Después de haber concluido la prueba de mecanizado, se han realizado las comprobaciones y mediciones pertinentes, que sirven como herramienta para concluir si existe una buena calibración del TCP y WOBJ.

En la siguiente tabla se muestran los valores medio de la trayectorias medidas en máquina de medición por coordenadas.

Cota	Teórico (mm)	Método 1 (mm)	Método 2 (mm)	Método 3 Z fine (mm)	Método 3 Z0 (mm)
A	94	94,1	94,0	94,3	94,5
B	94	94,0	94,4	94,2	94,2
C	94	94.1	94,5	94,2	94,4
D	94	94.2	94,0	94,5	94,5

Tabla 3.14 Resultados dimensionales en milímetros.

Los resultado obtenidos permite extraer las siguiente conclusiones:

1. Se valida el procedimiento de calibración de TCP y WOBJ desarrollado, valores de precisión de mecanizado inferiores a dos micras se consideran buenos para

una CMR con un robot IRB 6660. Un calibrado de TCP que permita realizar trayectorias con precisión mejor o igual a 0.2 mm es satisfactorio (Método 1). Un calibrado de WOBJ que permita realizar trayectorias con precisión mejor o igual a 0.5 mm es satisfactorio.

2. Se verifica que la ejecución de estrategias de mecanizado robotizado con ejes externos inducen un incremento del error de precisión durante el conformado.

Nótese que durante el proceso de medición, se ha podido comprobar que la mordaza tenía una desorientación respecto a su base por lo que las figuras han quedado igualmente desorientadas respecto a los ejes del universo. Sin embargo esto no supone una evidencia para concluir que el equipo se encuentra mal calibrado, sino que, se deben medir las dimensiones de la base del contorneado prismático, ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, teniendo estas que coincidir con los valores teóricos, para de esta manera, poder enunciar que el sistema está bien calibrado.

**Incidencias:** Cabe destacar que en el primer intento de la prueba por el método 3, se ha generado una trayectoria que contiene movimiento coordinado de mesa y robot incluyendo instrucciones tipo Move J, Move L, y Move C. La geometría alcanzada con esta caracterización no se corresponde con la proyectada en el CAD de la pieza, ya que el robot no es capaz a realizar movimiento coordinado con la mesa para los movimientos tipo MoveC. Por lo cual en un segundo intento se ha optado por emplear movimientos Move L con Z fine. En esta trayectoria la herramienta se detiene en cada punto obteniendo acabados mejorables, ya que en cada parada deja una huella en la pieza. Así que, finalmente se ha realizado un último intento de la prueba utilizando movimientos del robot Move L con Z0, acabado obteniendo mejores resultados de que por Z fine.

**Nota:** La medición de las probetas ensayadas en la fase experiemntal se lleva a cabo en una máquina de medición por coordenadas, salvo indicación diferente. La máquina MITUTOYO, modelo EUROCC-APEX 122010, nº de serie N0042112, nº de identificación A/P/L39, está dotada de un cabezal motorizado PH10M. La Incertidumbre de los resultados se calcula según la ecuación  $5+(5*L/1000)$  micras. La toma de valores se ha de realizar con diligencia para evitar errores por la baja rigidez del material.

## 5. Caracterización de la celda experimental

En este apartado se describe la geometría de pieza que se utiliza en la fase experimental y se define la trayectoria de mecanizado. Es de vital importancia determinar la cantidad de puntos de la trayectoria a estudiar, pues serán considerados en la aplicación de los procedimientos establecidos en el capítulo anterior. Los valores simulados y medidos nos permitirá validar el modelo reducido equivalente de la mecánica del robot.

### 5.1. Definición de la trayectoria de corte

Antes de establecer la trayectoria de corte se han valorado diferentes alternativas relativas a la operación de mecanizado más apropiada para aplicación en la validación del modelo de interacción entre la mecánica del robot y el proceso de corte. Se conviene que la operación de ranurado es la más adecuada por su sencillez para establecer una geometría de viruta y resultante de las fuerzas de corte que sea independiente del solape entre pasada. De esta manera se ha definido la geometría de ensayo y la pieza de pruebas.

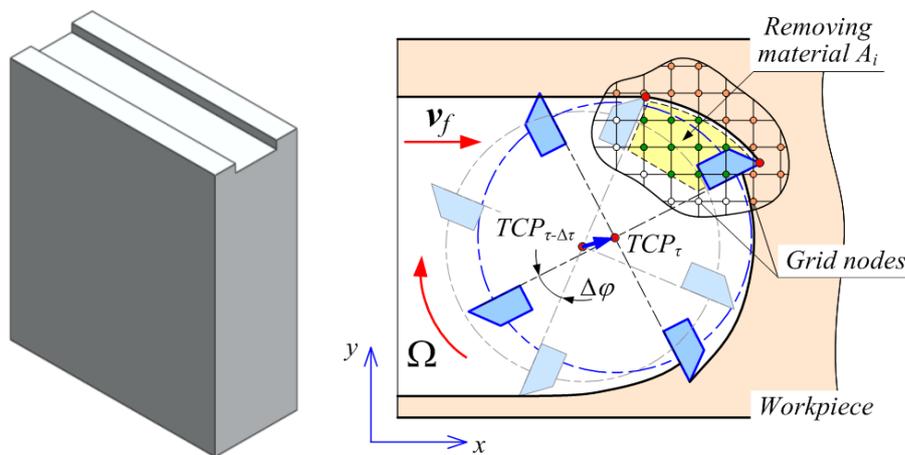


Ilustración 3.71 Selección de la operación de ensayo.

Se ha definido la trayectoria mediante Mastercam, estudiando primero las opciones de programación disponibles. Las entradas/salidas de la herramienta se han realizado desde fuera de la pieza, no considerando ningún tipo de rampa. Se obtienen por tanto los puntos programados por los que sistema de control del robot forzará a pasar el TCP de la herramienta

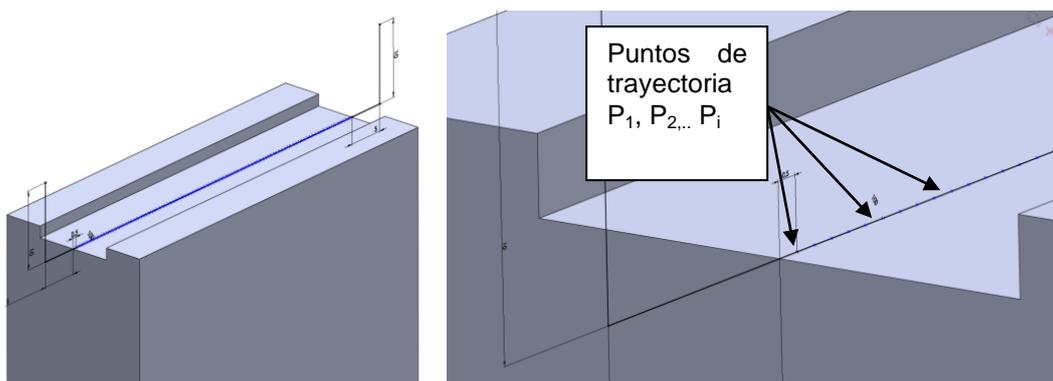


Ilustración 3.72 Trayectoria programada y distancia entre puntos de trayectoria.

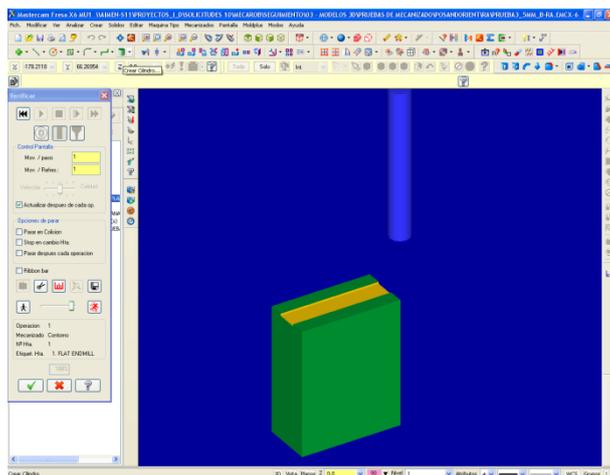


Ilustración 3.73 Mecanizado de la ranura.

## 5.2. Determinación de las matrices de rigidez y amortiguamiento

Determinado los puntos de trayectoria  $P_i$  definidos por las coordenadas  $(x_i, y_i, z_i)$  en el espacio cartesiano, y con sus correspondientes valores  $(\theta_1, \dots, \theta_i)$  según la cinemática extendida del robot, se lleva a cabo el procedimiento desarrollado en el capítulo II para determinar las matrices de rigidez y amortiguamiento. El planteamiento a nivel experimental consistió en posicionar el TCP en el puntos  $P_i$  de la trayectoria, aplicar cargas de valor conocido que desequilibra la posición estable de la estructura y retirarla instantáneamente. Durante el fenómeno de oscilación amortiguada se registrar la deformación que inducida en los para las tres direcciones del sistema cartesiano y los tiempos de estabilización hasta llegar al nuevo equilibrio. Este procedimiento se repite 3 veces para cada punto.

Punto de trayectoria	$F_{x_1}$ (N)	$D_{x_1}$ (mm)	$D_{y_1}$ (mm)	$D_{z_1}$ (mm)	$t_1$ (ms)	$F_{x_2}$ (N)	$D_{x_2}$ (mm)	$D_{y_2}$ (mm)	$D_{z_2}$ (mm)	$t_2$ (ms)
P1	100	0,34	0,008	0,007	4.538	200	0,600	0,020	0,009	5.578
P2	100	0,345	0,020	0,011	5.684	200	0,625	0,041	0,016	6.614
P3	100	0,343	0,03	0,008	5.623	200	0,625	0,048	0,018	6.123
P4	100	0,34	0,009	0,009	5.684	200	0,651	0,06	0,020	5.984
P5	100	0,34	0,054	0,013	6.637	200	0,695	0,078	0,019	6.037
P6	100	0,38	0,020	0,021	5.984	200	0,745	0,06	0,031	6.984
P7	100	0,395	0,033	0,003	5.984	200	0,765	0,07	0,013	5.284
P8	100	0,475	0,027	0,007	5.457	200	0,825	0,067	0,004	5.983

Tabla 3.15 Ejemplo de datos de las mediciones.

Para facilitar la ardua labor de medición se decide establecer medidas en puntos de trayectoria distanciados 5 mm entre sí. El volumen de datos generado es importante y debe ser tratado de manera adecuada.

Para determinar las matrices rigidez y amortiguamiento a partir de la ecuación que rige el comportamiento oscilante amortiguado, reducido al comportamiento dinámico puntual (TCP) en el espacio cartesiano.

$$[M_{eq}(P_i, \theta_{1...}\theta_i)][\ddot{X}] + [C_r(P_i, \theta_{1...}\theta_i)][\dot{X}] + [K_r(P_i, \theta_{1...}\theta_i)]X = 0$$

se procede de la siguiente manera:

- $M_{eq}(P_i, \theta_{1...}\theta_i)$  : la matriz equivalente de la masa de los ejes del robot y cabezal de mecanizado es obtenida mediante técnicas de reducción<sup>26</sup>, para un determinado punto  $P_i$  del espacio de trabajo con una configuración de ejes robot definida.

Coordenada de articulación, [deg]					
$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_5$	$\theta_6$
90	-50	120	180	25	180
Rigidez de los brazos, [rad/N m]*10 <sup>-6</sup>					
$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$	$k_6$
0.26	0.15	0.26	1.79	1.52	2.13
Masa de los brazos, [kg]					
$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$	$m_5$	$m_6$
336.8	259.4	85.2	54.5	36.3	18.2

Tabla 3.16 Ejemplo de cálculo.

- $K_r(P_i, \theta_{1...}\theta_i)$  se obtiene experimentalmente de la deformación experimentada por el TCP bajo la acción de una fuerza externa.
- $C_r(P_i, \theta_{1...}\theta_i)$  se obtiene de mediante la resolución de la ecuación de movimiento oscilante amortiguado, las matrices anteriormente calculadas y los datos experimentales. Para ello se nos apoyamos en el métodos de Green y resolución de ecuaciones diferenciales matriciales.

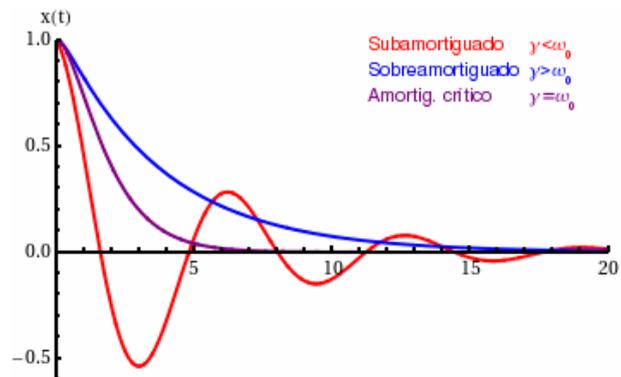


Ilustración 3.74 Representación de los tipos de amortiguamientos.

<sup>26</sup> Briot S., Pashkevich A., Chablat D. Reduced elastodynamic modelling of parallel robots for the computation of their natural frequencies. 13th World Congress in Mechanism and Machine Science, 19 - 25 Juin, 2011, Guanajuato, Mexico.

### 5.2.1. Ensayo de impacto y análisis modal.

Para que el modelo de interacción ente las mecánica del robot y el proceso de corte tenga validez es necesario que el fenómeno oscilatorio forzado no se acople con las frecuencias naturales del sistema. Para determinar cuán lejos estamos de esta situación y establecer un intervalo de trabajo estable es necesario realizar ensayo de impacto y realizar un análisis modal de la estructura para los puntos de trayectoria.

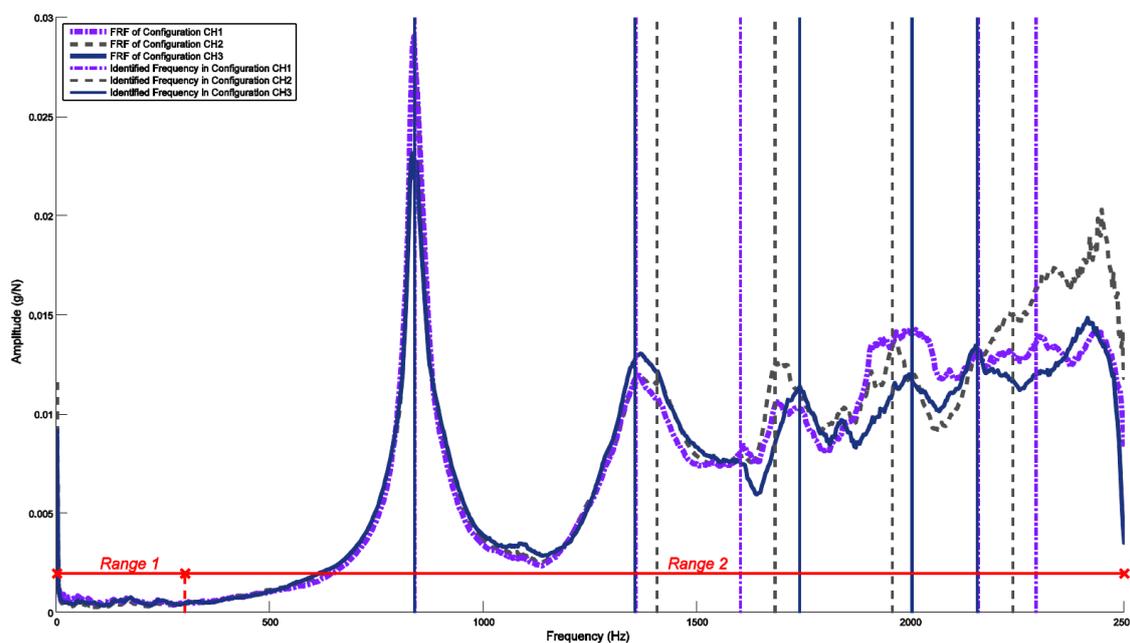


Ilustración 3.75 FRF medidas para dos configuración 6660<sup>27</sup>.

Modes of Range 2	CH1		CH2		CH3		Frequency relative standard deviation (%)
	Natural Frequency (Hz)	Damping ratio (%)	Natural Frequency (Hz)	Damping ratio (%)	Natural Frequency (Hz)	Damping ratio (%)	
1	838.098	1.64	836.943	1.42	837.307	1.69	0.07
2	1355.805	5.18	1405.344	1.63	1353.071	5.26	2.14
3	1600.899	0.89	1681.242	0.97	1739.929	2.14	4.16
4	2158.787	2.58	1956.837	0.79	2002.339	0.62	5.19
5	2292.898	1.25	2239.069	6.04	2155.372	2.05	3.1

Tabla 3.17 Frecuencias propias de vibración para una configuración de robot.

<sup>27</sup> Mejri S., at all; "Experimental protocol for the dynamic modeling of machining robots"; 21ème Congrès Français de Mécanique Bordeaux, 2013.

## 6. Validación del modelo reducido equivalente

Determinadas las matrices que caracterizan el modelo reducido equivalente de la mecánica del robot, se realiza una comprobación experimental para corroborar la linealidad del sistema dentro del campo de trabajo.

En la siguiente tabla se reflejan las medidas experimentales y las calculadas para el valor de fuerza o desplazamiento equivalente aplicado.

Punto de trayectoria	$F_{x_1}$ (N)	$Dx_{1m}$ (mm)	$Dy_{1m}$ (mm)	$Dz_{1m}$ (mm)	$Dx_{2c}$ (mm)	$Dy_{2c}$ (mm)	$Dz_{1c}$ (mm)
P1	150	0,49	0,020	0,009	0,47	0,019	0,009
P2	150	0,495	0,041	0,016	0,495	0,041	0,016
P3	150	0,493	0,048	0,018	0,493	0,048	0,018
P4	150	0,49	0,06	0,020	0,49	0,06	0,020
P5	150	0,48	0,078	0,019	0,48	0,078	0,019
P6	150	0,53	0,06	0,031	0,53	0,06	0,031
P7	150	0,545	0,07	0,013	0,545	0,07	0,013
P8	150	0,625	0,067	0,004	0,625	0,067	0,004

**Tabla 3.18 Comparativa entre valores simulados y medidos.**

## 7. Validación del modelo de interacción entre la mecánica del robot y el proceso de corte

A continuación se describen los resultados obtenidos de los ensayos para validación del modelo de interacción entre la mecánica de la máquina y el proceso de corte, caracterizado para el robot industrial ABB IRB 6660, la herramienta de corte KENDU 204.60 D10x22x150, mediante de operación de ranurado de aluminio EN AW - 5083 y espuma rígida de poliuretano (PUR).

Densidad [gr/cm <sup>3</sup> ]	2.66	Coef. De dilatación (0 a 100 °C) [°C <sup>-1</sup> x 10 <sup>6</sup> ]	23.9
Rango de fusión [°C]	580 – 640	Conductividad Térmica (0 a 100 °C) [W/m °C]	Temple 0/H32: 120
Módulo de elasticidad [MPa]	71000	Resistividad a 20 °C [μΩcm]	Temple 0/H32: 6.0
Coeficiente de Poisson	0.33	Calor específico (0 a 100 °C)	945

Tabla 3.19 Propiedades físicas del Aluminio 5083.

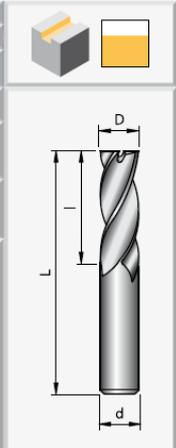
La herramienta utilizada es una fresa de metal duro de dos filos de corte con d = 10 mm. Los parámetros de fresado son n = 8000 rpm, vf = 50 mm / s, ap = 1÷2 mm.



- Fresa frontal 2 labios, extra larga - Corte al centro
- 2 flute end mill, extra long - Center cutting
- Fraise cylindrique en bout à 2 dents, extra longue - Coupe au centre
- Fresa cilíndrica frontal a 2 denti, extra lunga - Taglio al centro
- Schaftfräser, 2 Schneiden, extra lang - Zentrumschnitt
- 2-х зубья фреза концевая с режущей кромкой через центр, экстрадлинная серия

Acero Steel <1400N/mm <sup>2</sup>	Inox Stainless	Fundición Cast iron	ALU Mg	Cu	Materiales sintéticos Fiber	Grafito Graphite	Ti	Ni	Acero Steel 45=50 HRc	Acero Steel 50=70 HRc
☺	☺	☺		☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺

XL			
NORMAL	K-CROM		
<b>204.60</b>	<b>204.67</b>		
HARD METAL	MG 10		



TYP N					XL	XL
D	d	L	L	Z	204.60.	204.67.
<small>h10</small>	<small>h6</small>					
3	3	10	75	2	00300	00300
4	4	11	100	2	00400	00400
5	5	13	100	2	00500	00500
6	6	13	150	2	00600	00600
8	8	19	150	2	00800	00800
10	10	22	150	2	01000	01000
12	12	26	150	2	01200	01200
14	14	26	150	2	01400	01400
16	16	32	150	2	01600	01600
20	20	38	150	2	02000.20	02000.20

Tabla 3.20 Herramienta de fresado.

Los ensayos realizados se llevan a cabo utilizando la misma trayectoria descrita en el apartado de definición de trayectoria de corte. Los puntos de trayectoria corresponden con los medidos para determinación de la matrices de rigidez y amortiguamiento del modelo reducido equivalente a la mecánica del robot.

## 7.1. Comparativa resultados

En la siguiente imagen se muestra el resultado de las pruebas de mecanizado de la ranura sobre los dos materiales



**Ilustración 3.76 Probetas mecanizadas en Aluminio y PUR.**

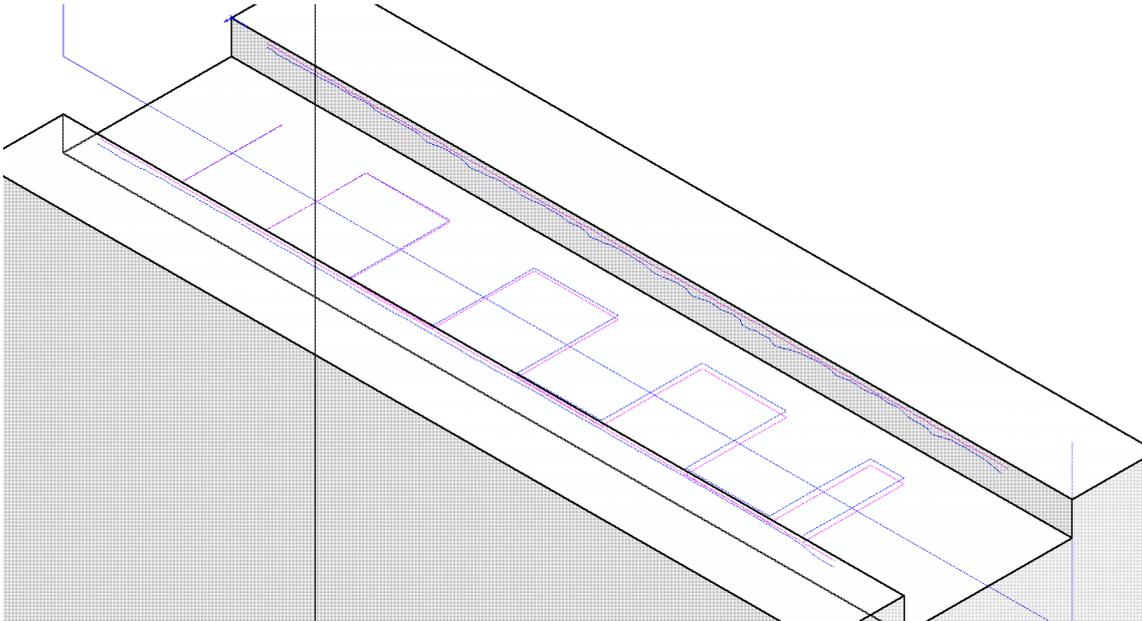
Mediante el empleo de la máquina de medición de coordenadas indicada anteriormente se realizan las mediciones de las ranuras. Para disponer de una información ampliada de la geometría generada durante tras mecanizado se considera proceder de la siguiente manera:

- Determinación del ancho de la ranura: se medirán los perfiles de ambos lados de la ranura y se reproducirá la forma obtenida. Además se determinará, las desviaciones medias, máximas y mínimas entre ambos perfiles
- Determinación de la profundidad de la ranura: Se toma un muestreo de puntos de la superficie y se determina al plano medio.

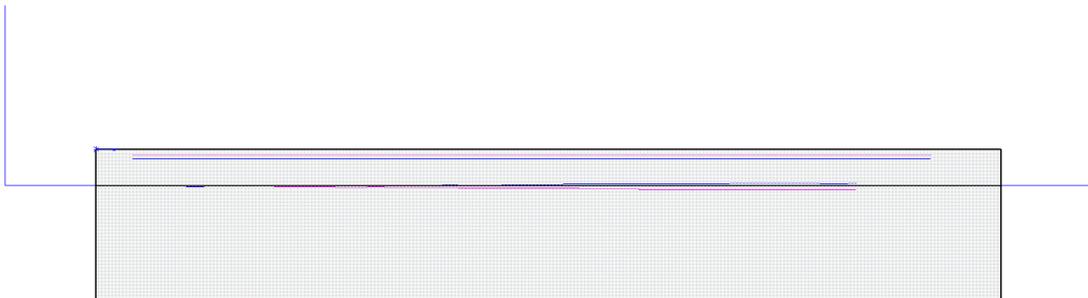
Ensayo	MAX.RANURA	MIN.RANURA	MED.RANURA	MAX.PLANO	MEDIO.PLANO	MIN.PLANO
<b>E1</b>	9,999	9,442	9,956	2,073	1,957	1,849
<b>E9</b>	9,874	9,807	9,889	2,240	2,144	2,023

**Tabla 3.21 Estudio factorial de Variables.**

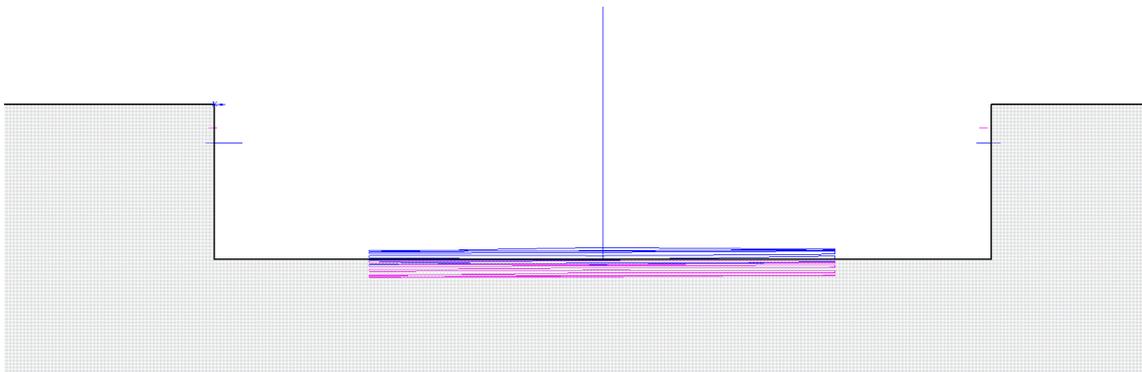
Para una mejor comprensión las mediciones realizadas se representan superpuestas la ranura original y las mediciones practicada para cada material.



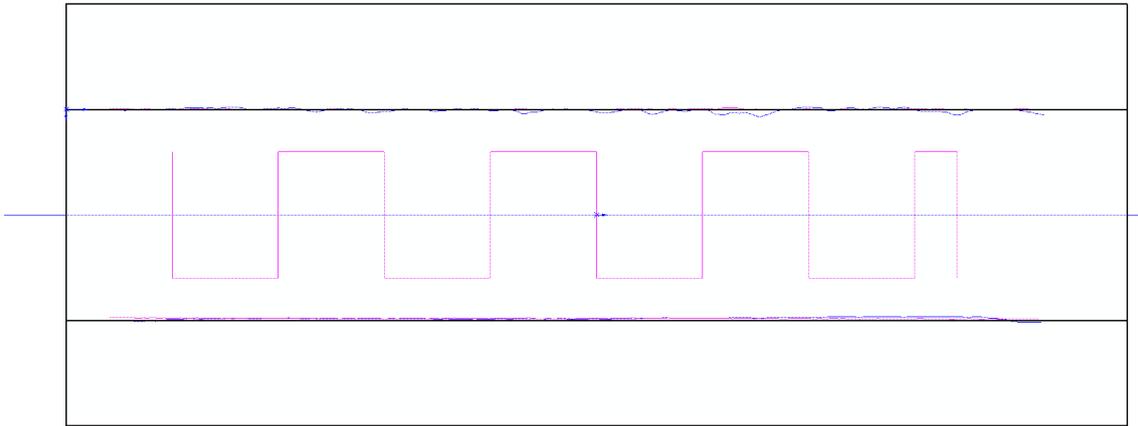
**Ilustración 3.77 Vista isométrica superponiendo mediciones en Aluminio y PUR.**



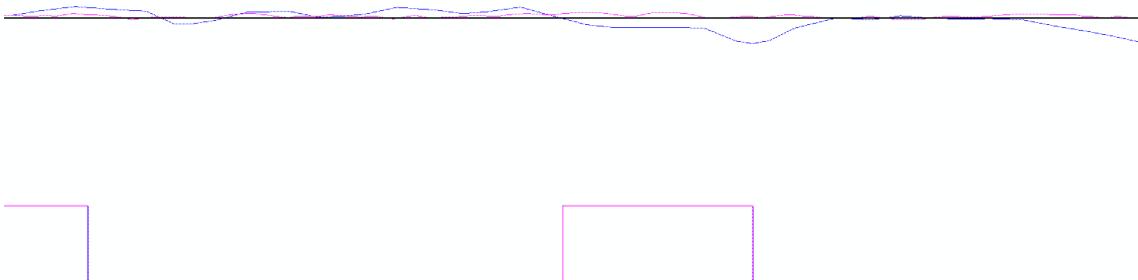
**Ilustración 3.78 Vista lateral superponiendo mediciones en Aluminio y PUR.**



**Ilustración 3.79 Vista frontal superponiendo mediciones en Aluminio y PUR.**



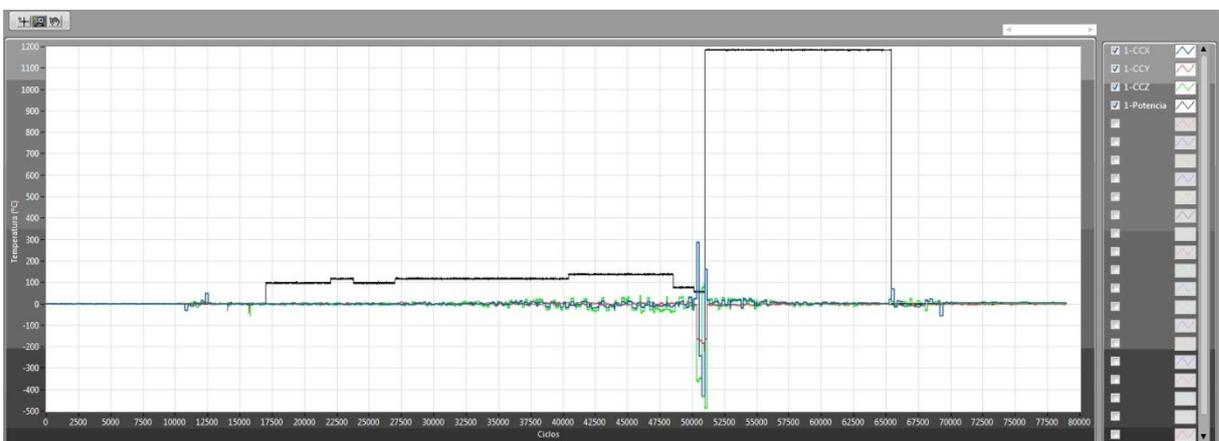
**Ilustración 3.80 Vista superior superponiendo mediciones en Aluminio y PUR.**



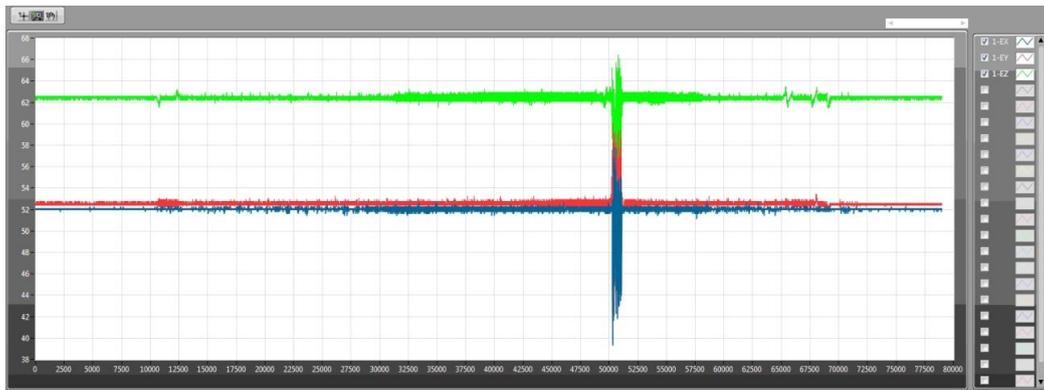
**Ilustración 3.81 Vista superior ampliada superponiendo en Aluminio y PUR.**

De la imágenes y la tablas de medidas se extrae que el mecanizado de aluminio establece unas exigencias superiores al sistema robotizado. La dureza del material es determinante en la desviación del TCP de la herramienta. Los resultados de desviación se corresponden en un 45-55% con los estimados mediante simulación.

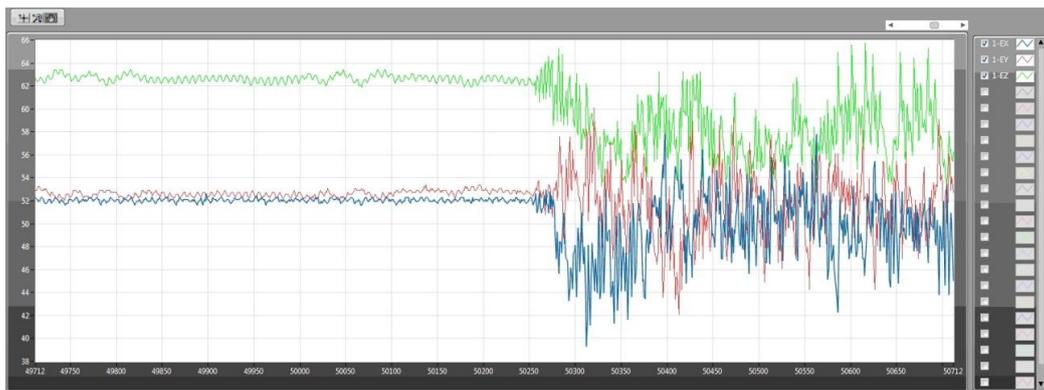
A continuación gráficas obtenidas en la monitorización:



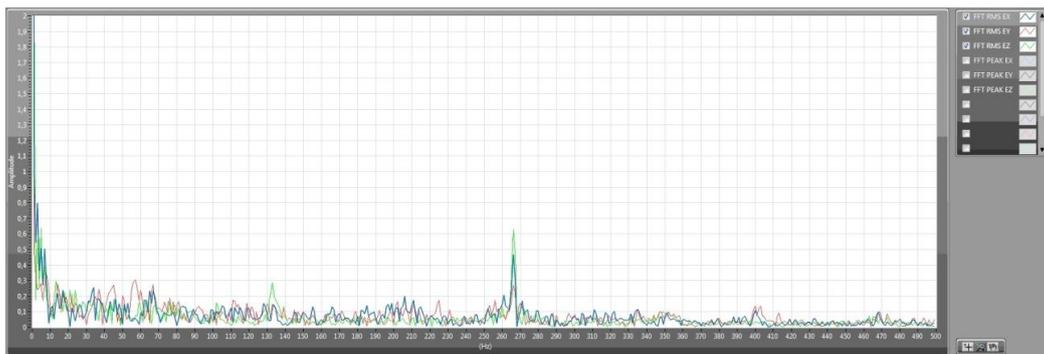
**Ilustración 3.82 Esfuerzos y potencia consumida en Aluminio.**



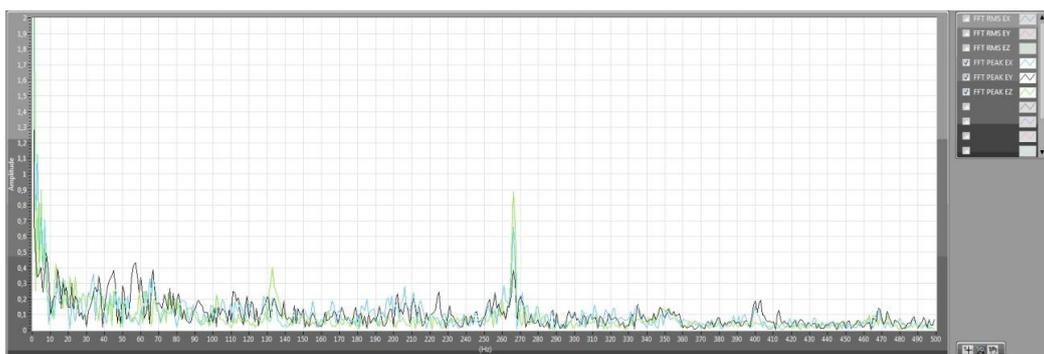
**Ilustración 3.83 Aceleraciones registradas en Aluminio.**



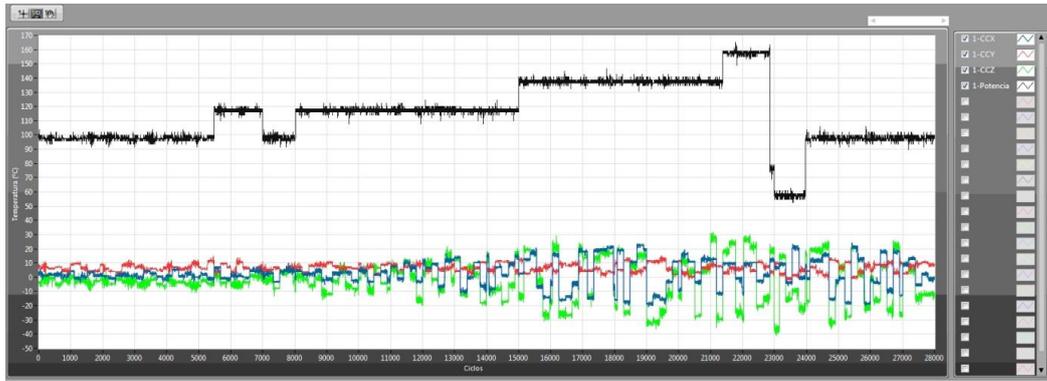
**Ilustración 3.84 Aceleraciones registradas en Aluminio entrada herramienta.**



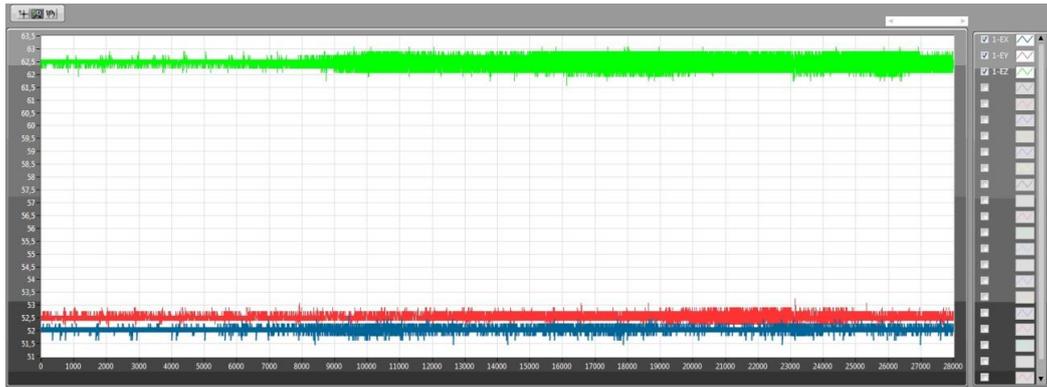
**Ilustración 3.85 FFT en RMS en Aluminio.**



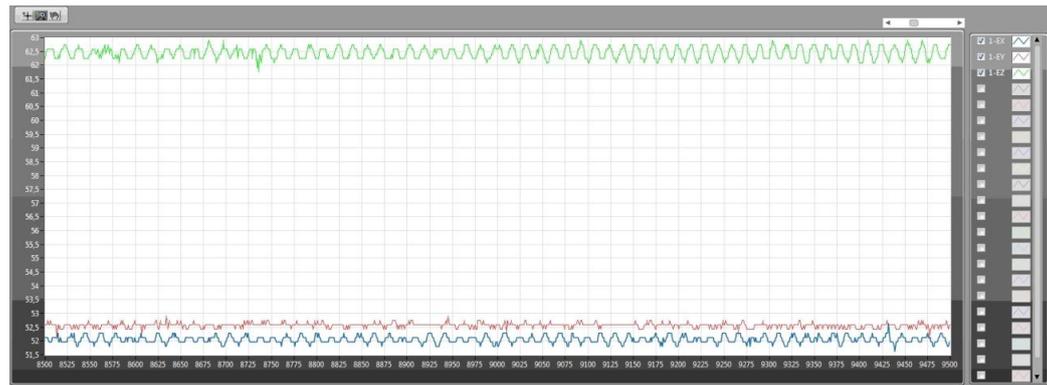
**Ilustración 3.86 FFT en PEAK en Aluminio.**



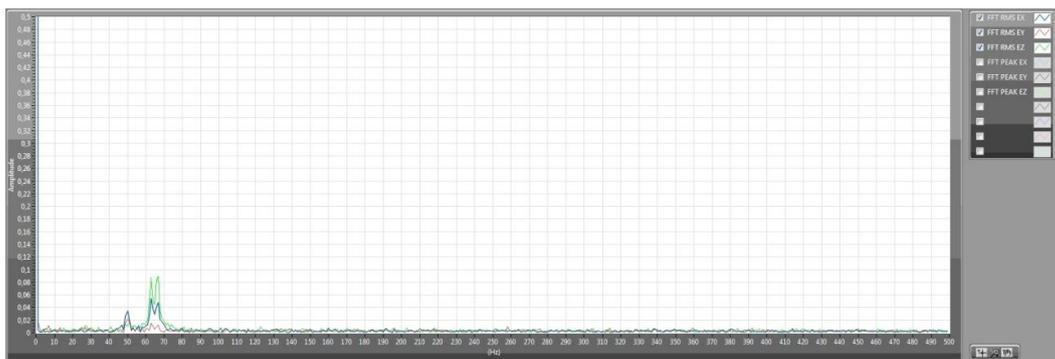
**Ilustración 3.87 Esfuerzos y potencia consumida en PUR.**



**Ilustración 3.88 Aceleraciones registradas en PUR.**



**Ilustración 3.89 Aceleraciones registradas en PUR entrada herramienta.**



**Ilustración 3.90 FFT en RMS en PUR.**

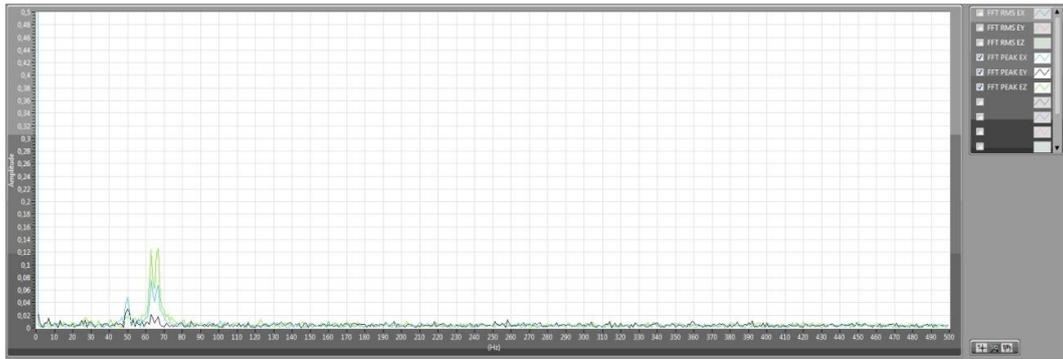


Ilustración 3.91 FFT en PEAK en PUR.

## 7.2. Conclusiones del modelo

Se valida el modelo de interacción entre la mecánica del robot y las fuerzas de corte, así como el procedimiento de monitorización de señales.

Nota; las desviaciones absolutas de ancho y profundidad de ranura son superiores a los que extrae el modelo. El establecimiento de puntos de trayectoria que distan entre 5 mm es demasiado generoso, pues el control solo obliga al TCP a pasar por el punto programado en esas posiciones, y no tiene tanta precisión de movimiento como se esperaba. Una programación de trayectoria con puntos cada 0.5 mm podría mejorar el resultado sustancialmente.

## 8. Optimización experimental de los parámetros del proceso

### 8.1. Descripción de los ensayos

Una vez realizados validados los desarrollos realizados y caracterizada la CMR, se ha puesto en marcha la batería de pruebas de mecanizado que han permitido optimizar las condiciones de corte. El objetivo de esta prueba ha sido evaluar la influencia de ciertos parámetros de mecanizado sobre la precisión del sistema. En este caso se ha analizado la influencia de la dureza del material, posición de pieza, velocidad de avance y velocidad de rotación, sentido de fresado, etc.

En la siguiente tabla se resume el estudio factorial, dando lugar a la matriz 2x5.

Factor	P (x,y,z)	n (rpm)	a <sub>p</sub> (mm)	Dirección	Material
+	A	8000	1,5	Longitudinal	Aluminio
-	B	6000	1	Transversal	PU

**Tabla 3.22 Estudio factorial de Variables.**

A continuación se muestra la tabla de ensayos confeccionada:

Ensayo	P	n	ap	D	M	Ensayo	P	n	ap	D	M
E1	A	8000	1,5	L	Aluminio	E17	B	8000	1,5	L	Aluminio
E2	A	8000	1	L	Aluminio	E18	B	8000	1	L	Aluminio
E3	A	6000	1,5	L	Aluminio	E19	B	6000	1,5	L	Aluminio
E4	A	6000	1	L	Aluminio	E20	B	6000	1	L	Aluminio
E5	A	8000	1,5	T	Aluminio	E21	B	8000	1,5	T	Aluminio
E6	A	8000	1	T	Aluminio	E22	B	8000	1	T	Aluminio
E7	A	6000	1,5	T	Aluminio	E23	B	6000	1,5	T	Aluminio
E8	A	6000	1	T	Aluminio	E24	B	6000	1	T	Aluminio
E9	A	8000	1,5	L	PUR	E25	B	8000	1,5	L	PUR
E10	A	8000	1	L	PUR	E26	B	8000	1	L	PUR
E11	A	6000	1,5	L	PUR	E27	B	6000	1,5	L	PUR
E12	A	6000	1	L	PUR	E28	B	6000	1	L	PUR
E13	A	8000	1,5	T	PUR	E29	B	8000	1,5	T	PUR
E14	A	8000	1	T	PUR	E30	B	8000	1	T	PUR
E15	A	6000	1,5	T	PUR	E31	B	6000	1,5	T	PUR
E16	A	6000	1	T	PUR	E32	B	6000	1	T	PUR

**Tabla 3.23 Ensayos Realizados.**

Para evaluar la importancia de la mecánica del robot se evalúan dos posiciones: A y B

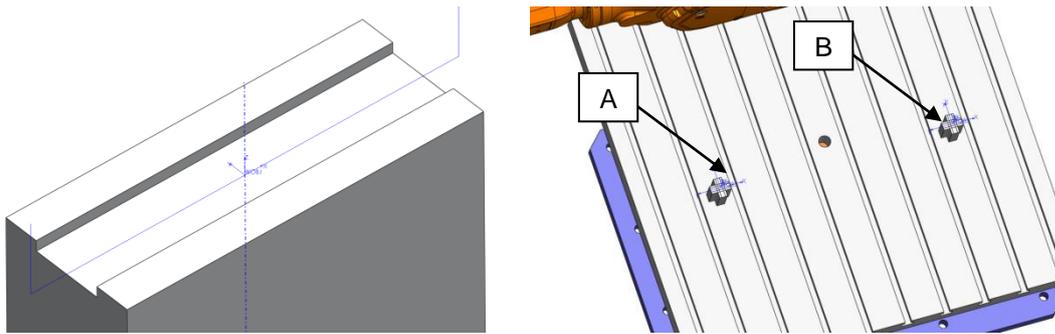


Ilustración 3.92 Posiciones y trayectorias de corte.

Para evaluar la importancia de la orientación del vector fuerza se definen dos direcciones: L y T

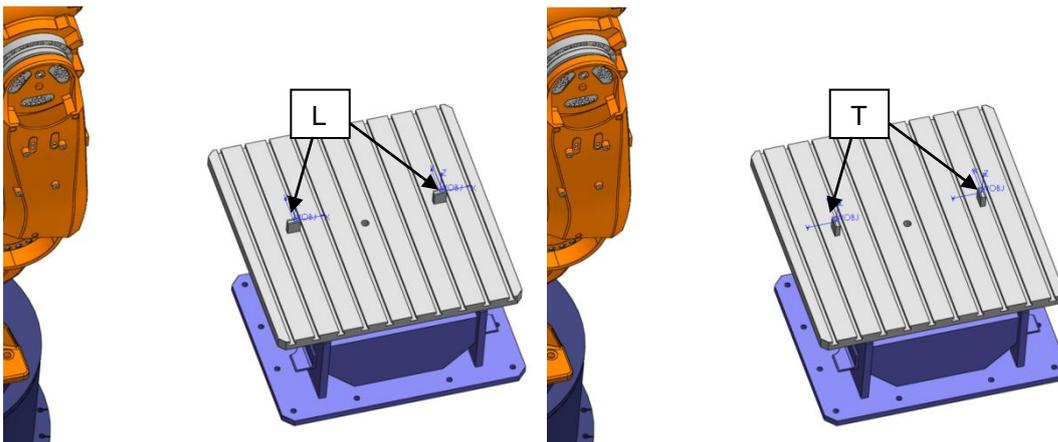


Ilustración 3.93 Orientación del vector fuerza.

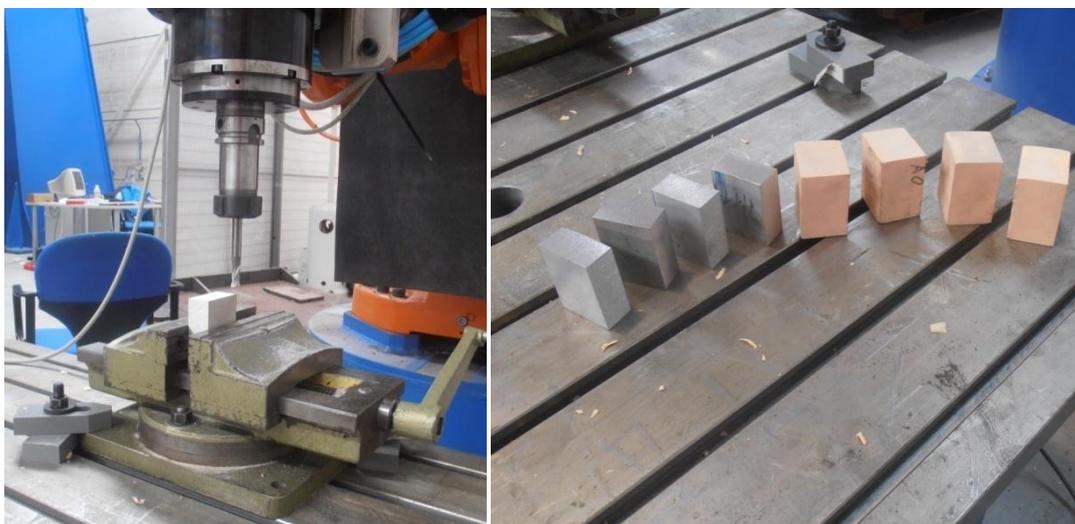


Ilustración 3.94 Ejecución de las pruebas de mecanizado.

En la siguiente tabla se resumen los resultados de las mediciones realizadas

Ensayo	Max.ranura	Min.ranura	Med.ranura	Max.plano	Medio.plano	Min.plano
E1	9,999	9,442	9,956	2,073	1,957	1,849
E2	9,721	9,170	9,759	0,746	0,495	0,299
E3	9,733	9,000	9,840	2,570	2,157	1,714
E4	9,744	9,484	9,692	0,964	0,499	0,063
E5	9,917	9,171	9,774	1,646	1,556	1,430
E6	10,175	7,933	9,844	1,197	1,087	0,867
E7	10,302	9,036	9,976	1,725	1,632	1,518
E8	9,908	9,014	9,750	1,098	1,006	0,858
E9	9,874	9,807	9,889	2,240	2,144	2,023
E11	10,232	9,772	10,076	2,894	2,648	2,273
E13	9,963	9,618	9,926	2,228	2,033	1,657
E15	9,941	9,664	9,826	2,823	2,682	2,502
E17	9,720	8,922	9,835	1,690	1,379	1,029
E18	9,549	8,783	9,824	1,879	1,589	1,270
E19	9,509	9,092	9,755	1,712	1,388	1,022
E20	9,271	9,226	9,754	2,076	2,009	1,959
E21	10,202	9,171	9,916	2,082	1,706	1,191
E22	9,967	9,177	9,831	1,859	1,653	1,349
E23	10,087	9,476	9,922	1,960	1,612	1,150
E24	10,148	9,233	9,975	1,997	1,819	1,542
E25	9,880	9,776	9,845	2,363	2,194	2,011
E27	9,906	9,739	9,903	2,344	2,153	1,952
E29	9,905	9,689	9,921	2,535	2,422	2,305
E31	9,905	9,755	9,913	2,673	2,550	2,346

**Tabla 3.24 Medidas Precisión de los ensayos.**

## **8.2. Comparativa resultados**

Analizando los resultados se puede concluir que los factores que mayor influencia tienen sobre la precisión en el estudio factorial realizado, ordenados de mayor a menor importancia, son:

1. La dureza del material a mecanizar
2. El comportamiento mecánico de robot, en función de la posición P (B) y Dirección de trabajo (T).
3. La profundidad de pasada,  $a_p$ (mm)
4. La velocidad de giro de mandrino,  $n$  (rpm)

## 9. Extensión del modelo de interacción a operaciones de planeado de superficies.

### 9.1. Descripción del ensayo

Los primeros ensayos de planitud han consistido en realizar operaciones de mecanizado de una superficie elemental, un planificado. El objetivo de esta prueba es evaluar la influencia de ciertos parámetros de mecanizado sobre la precisión del sistema. En este caso se ha analizado la influencia de la orientación de cabezal, posición de pieza en mesa, velocidad de avance y velocidad del cabezal. Las pruebas se realizan según normativa UNE-ISO 9283 y se establecen estos otros parámetros:

- Los valores de carga e inercia del cabezal, así como la posición del TCP de la herramienta corresponden con los valores comentados en el desarrollo experimental y permanecerán fijos durante la ejecución de los ensayos.
- Se ha adoptado una estrategia de planeado en concordancia, 10 trayectorias en Zig-Zag, solape del 20% y 6 mm profundidad de corte. La entrada y salida de la herramienta se realiza a la velocidad de trabajo, la rampa de aceleraciones en el robot se estable en 20%-20%.
- Las probetas de ensayo son tochos de 100 de ancho, 500 mm de largo y 60 mm del alto. Dichas probetas se construyen a partir una placa de poliuretano, denominación RENSHAPE BM5025.
- Se ha empleado una fresa plana equilibrada de diámetro 15,5 mm, 4 filos, longitud 150 mm y longitud de corte de 60 mm, montada sobre un porta herramientas HSK 63.
- La programación de las trayectorias se realiza en Mastercam y la simulación del proceso antes de generar el código robot se lleva a cabo en RObotmaster.

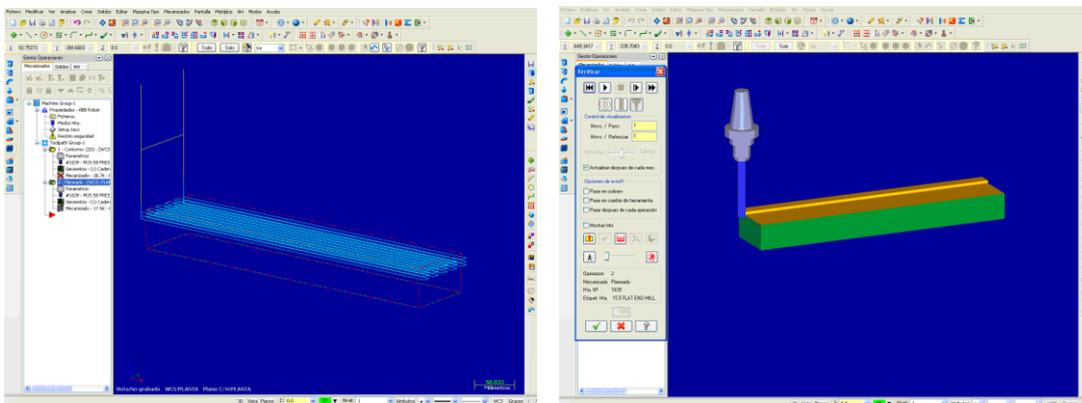
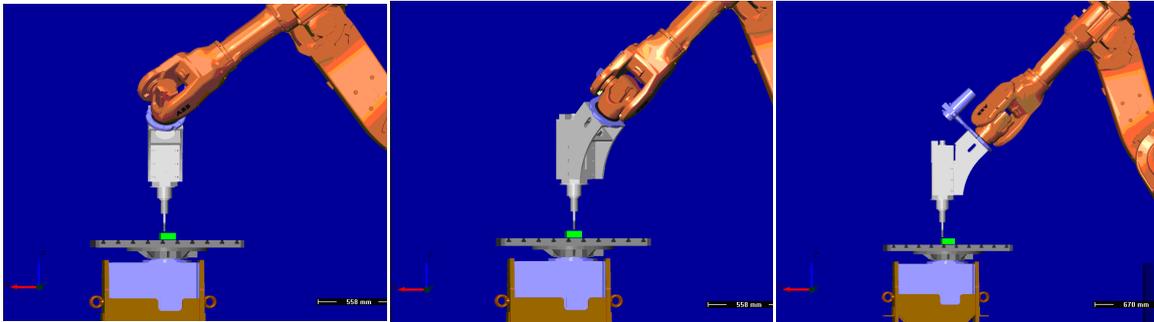


Ilustración 3.95 Programación y Simulación de las trayectorias en MASTERCAM.

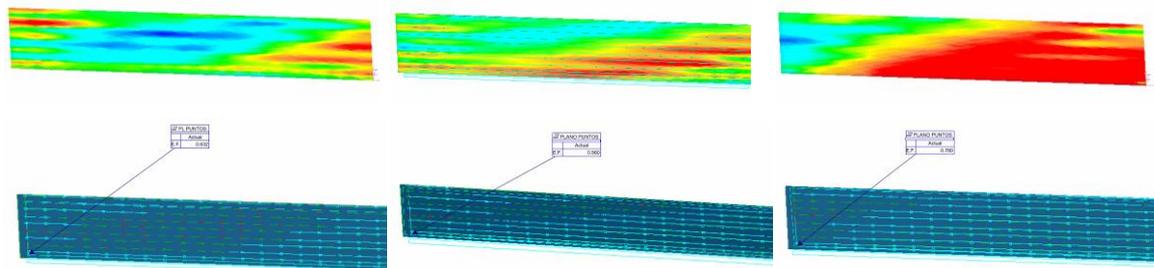
## 9.2. Mediciones

En este ensayo se ha puesto especial énfasis sobre la influencia de la orientación del cabezal (configuración de ejes): En estos ensayos el objeto de trabajo se dispuso en la posición  $X= 2.2125,560$ ;  $Y= -310,620$ ;  $Z=99,500$  y con una orientación de  $R_x= 0.05$ ;  $R_y= 0.03$ ;  $R_z= -88.39$ . La velocidad de avance de la herramienta es  $V_a= 9.000$  mm/min y la velocidad de rotación del cabezal es de  $N= 12.000$  r.p.m para todas las muestras ensayadas.

A0 - Configuración de ejes  $0^\circ$       A45 - Configuración de ejes  $45^\circ$       A90 - Configuración de ejes  $90^\circ$



### Mediciones



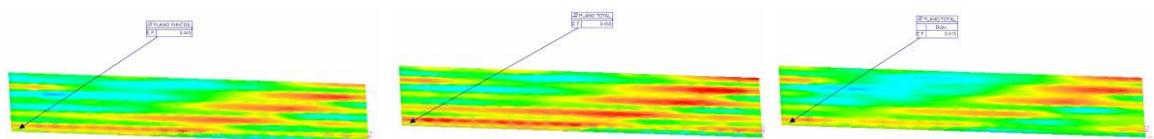
Error de planitud = 0.632 mm      Error de planitud = 0.560 mm      Error de planitud = 0.760 mm

**Ilustración 3.96 Pruebas realizadas con el cabezal de mecanizado orientado a  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $90^\circ$**

También se ha evaluado la influencia de la velocidad de avance y velocidad del cabezal sobre la precisión del sistema. En estos ensayos el objeto de trabajo se dispuso en la posición en  $X= 2.119,75$ ;  $Y= -47,32$ ;  $Z=99,500$  y con una orientación de  $R_x= 0.05$ ;  $R_y= 0.03$ ;  $R_z= -87.92$ . La orientación del cabezal empleada corresponde con la configuración de ejes a  $45^\circ$ .

A1-  $V_a= 18.000$  mm/min      A2-  $V_a= 18.000$  mm/min      A3-  $V_a= 9.000$  mm/min  
 $N= 12.000$  r.p.m       $N= 24.000$  r.p.m       $N= 24.000$  r.p.m

### Mediciones



Error de planitud = 0.443 mm      Error de planitud = 0.445 mm      Error de planitud = 0.415 mm

**Ilustración 3.97 Pruebas realizadas variando la velocidad de avance y rotación.**

Estos ensayos aportan información cualitativa sobre las variables evaluadas:

- La orientación del cabezal de fresado provoca variaciones sobre error de planitud durante la ejecución de un planificado. La configuración de ejes a 45° arroja una amplitud de error menor que las otras configuraciones estudiadas.
- La velocidad de avance y rotación tiene menor influencia sobre el error de planitud que la orientación del cabezal. Al duplicar la velocidad de avance el error de planitud aumenta sensiblemente, mientras que un aumento en la velocidad de rotación prácticamente no modifica dicho valor.
- Si comparamos el ensayo A45 - configuración de ejes a 45° con el ensayo A3-Va= 9.000 mm/min N= 24.000 r.p.m observamos que el error de planitud se reduce considerablemente. La ubicación de la pieza y la velocidad de rotación son las dos únicas variables que difieren entre los dos ensayos.

## 10. Conclusiones y transferencia de resultados

Se ha desarrollado un sistema robotizado experimental versátil y una metodología que permite el mecanizado de materiales con un nivel de precisión aceptable. Las ventajas de este sistema robotizado frente a máquinas de prototipado rápido y/o máquinas CNC-Multieje radican en el coste, el área/volumen de de trabajo disponible, la posibilidad de incorporar ejes externos, etc. Por tanto, la celda de mecanizado representa una gran alternativa cuando se trata de asumir procesos de fabricación sobre materiales blandos con bajas exigencias de precisión y acabado superficial:

- El volumen de trabajo disponible para ejecutar las operaciones de mecanizado (1 m<sup>2</sup> de superficie y 1 metro de altura) es más que suficiente para la fabricación de un rango importante de piezas.
- La accesibilidad de la herramienta se ve muy favorecida al emplear un 7 eje de movimiento. Esto permite fabricar piezas de elevada complejidad de manera sencilla.
- La puesta en marcha de la celda experimentales ha sido óptima, pues el error detectado en las correspondientes pruebas de funcionamientos reflejan una precisión adecuada. Para ello ha sido vital desarrollar diferentes métodos que han permitido determinar la rigidez de la celda, las frecuencias naturales del sistema y modelar los esfuerzos de corte.
- Las precisiones logradas en la fabricación de las diferentes piezas depende del material a trabajar y de las condiciones de corte. Para las fabricaciones/pruebas realizadas, actuando sobre los valores de velocidad de avance y velocidad de rotación de la herramienta, se obtiene un rango de precisión que oscila entre 0,2 y 1 mm. Los movimientos de robot que inducen menor error de precisión de mecanizado son aquellos que utilizan en los ejes 1,2 y 3 para describir las trayectorias de trabajo. La robustez es un factor determinante sobre la consecución de trayectorias de trabajo precisas, por ello, debe evitarse emplear estrategias de mecanizado que utilicen los ejes 5 y 6 cuando se requiera de una precisión elevada en esta case de sistemas productivos.

El acabado superficial y la precisión lograda disminuye a medida que aumenta la dureza del material a trabajar. Los resultados más desfavorables aparecen cuando se realizan las pruebas de mecanizado sobre aluminio.

## CAPÍTULO IV: APORTACIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO

---

A continuación se describen las principales contribuciones de la investigación:

- **Metodología para el diseño de celdas robotizadas de mecanizado:** selección de robot, dimensionamiento de mandrino de mecanizado, elección de la configuración de muñeca robot y ubicación de ejes externos para maximizar el área de trabajo con una precisión de trayectoria aceptable y calibrada.
- **Desarrollo de métodos de calibración de TCP en robot y definición de Wobj** en ejes externos de un grado de libertad.
- **Desarrollo de un modelo teórico reducido que relaciona la interacción entre la mecánica del robot y las fuerzas del proceso de corte:** Este modelo es una de las novedades científica más destacables de la investigación, pues representa la formulación de un modelo que relaciona las fuerzas de corte, con el comportamiento mecánico del robot, tanto en términos de rigidez como a nivel dinámico o comportamiento. Este modelo permite predecir la desviación de trayectoria prevista y el grado de calidad superficial que se podrían alcanzar en determinadas condiciones de corte. También contribuye a establecer los principales parámetros y variables del proceso de mecanizado robotizado que posteriormente será estudiados en profundidad.
- **Se establecen procedimientos necesarios para caracterizar el modelo de interacción entre la mecánica del robot y las fuerzas de corte** adaptado a la peculiaridades de la celda experimental que la que se validará. Se establece un procedimiento para determinación de las matrices de rigidez y amortiguación de puntual referida a un sistemas de coordenadas cartesiano ubicado en el TCP del robot. También se describen los métodos de sensorización de esfuerzos y vibración del robot, indicando los medios de monitorización.
- **La optimización experimental de los parámetros del proceso**, en base al modelo de interacción entre la mecánica del robot y las fuerzas de proceso, es formulada para mejora la precisión y calidad superficial del mecanizado robotizado: la rigidez-amortiguación del robot (Mapa de valores caracterizados para el espacio de trabajo) y las fuerzas de corte son las principales variables a estudiar, por lo que se plantea, análisis de configuración de ejes robot más ventajosas (fuerzas y orientaciones), análisis de la mejor ubicación de la pieza y estudio de las condiciones de corte más adecuadas para mejor aprovechamiento del sistema robotizado, etc.
- **Se desarrolla la nueva metodología predictiva de aplicación al mecanizado robotizado:** los desarrollos teórico, a validar experimentalmente en el capítulo III, permiten disponer de técnicas y procedimientos que debidamente conjugados sirven para caracterizar celdas con robots antropomórficos de diversas cinemáticas y establecer nuevas estrategias de mecanizado robotizado. Esta metodología enuncia reglas y procedimientos que permiten optimizar el uso del robot antropomórficos para aplicaciones de mecanizado mediante la selección de condiciones de corte más adecuadas, la mejor utilización de la rigidez del robot para procesos de conformado por arranque de material, mejor orientación de las trayectoria de corte, ubicación más apropiada de la pieza de trabajo, etc.

Las principales líneas de investigación futuras que se desprenden de esta tesis son

- Necesidad de la evaluación del comportamiento del brazo robótico mediante el análisis de lóbulos de frecuencia, como herramienta potente para la correcta utilización del robot como sistema de fabricación, siendo necesario profundizar esta línea de trabajo mediante investigaciones teórico-experimentales.
- La implementación matemática del modelo de interacción entre el modelo reducido equivalente de la mecánica del robot y el esfuerzo de corte supondría la creación de una potente herramienta predictiva que los usuarios de robot de mecanizado podrían usar para validar el adecuado mecanizado de las piezas a fabricar mediante estos sistemas de fabricación. Similar o complementario con la generación y simulación de trayectoria CAM.
- Construcción del mapa de comportamiento mecánico de robot: extender la metodología de predictiva desarrollada en este proyecto a un área de trabajo determinado del robot, disponiendo de una base de datos con la información de rigidez y amortiguamiento de cada punto para una configuración de ejes robot determinada.

## CAPÍTULO V: BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] Bauer, J. et al; "Analysis of Industrial Robot Structure and Milling Process Interaction for Path Manipulation"; Process Machine Interactions, Springer; 2011
- [2] Höpler, R.; "A unifying object-oriented methodology to consolidate multibody dynamics computations in robot control"; PhD Thesis TU Darmstadt; 2004
- [3] Altintas, Y.; "Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations and CNC Design"; Cambridge University Press; 2000
- [4] Pan, Z. et al; "Chatter analysis of robotic machining process"; Journal of Materials Processing Technology, Vol.173, pp.301-309; 2006
- [5] Tobias, S., & Fishwick, W; "The chatter of lath tools under orthogonal cutting conditions"; The Transaction of the ASME, No. 80, pp. 1079–1088; 1958
- [6] Tlustý, J. & Poláček, M.; "The stability of machine tools against self excited vibrations in machining"; International Research in Production Engineering, ASME, pp. 465-474; 1963
- [7] González R., Iglesias I., et al; "Mecanizado De Materiales Blandos con un Sistema Robotizado"; 10º Congreso Interamericano de computación aplicada a la industria de procesos (CAIP´2011), Girona-España. Vol. 1, page 87, ISBN: 978-8484583554.
- [8] DePree, J. y Gesswein, C.; "Robotic machining White paper Project"; Halcyon Development; 2008
- [9] Hadley Brooks; A review of state-of-the-art large sized foam cutting rapid prototyping and manufacturing Technologies; Universidad de Canterbury; Nueva Zelanda; 2010.
- [10] Anton James Posthuma; Development of a novel robotically effected plastic foam sculpting system for rapid prototyping and manufacturing; Universidad de Canterbury; Nueva Zelanda; 2007.
- [11] Hsuan-kuan Huang; Rapid and flexible prototyping through a dual-robot workcell; Universidad del Sur de Australia; 2002.
- [12] W.S. Owen, E.A. Croft, y B. Benhabib; A multi-arm robotic system for optimal sculpting; Universidad de Toronto y Universidad de Columbia; Canadá; 2008.
- [13] Danchine Denis y Musumur Laxmi P.; Robotic deflashing of plastics with cutter guidance (US6086294); Fanuc Robotics North America; 2000.
- [14] Hoffmann James A. y ST Onge Douglas L.; Compliant end effector for an industrial robot (US5765975); ABB Technology Co; 1998.
- [15] J.F.C.P. Antunes Simoes, T.J. Coole, D.G. Cheshire y Antonio R. Pires; Analysis of multi-axis milling in an anthropomorphic robot, using the design of experiments methodology; Universidad Buckinghamshire Chilterns; Inglaterra; 2003.
- [16] Jan-Erik Andersson; Robot control for wood carving operations; Universidad de Linköping; Suecia; 2001.
- [17] Torgny Brogårdh; A method and an apparatus for programming a material removal process carried out on an object by means of a robot (WO2008113807); ABB Technology Co; 2008.
- [18] Wisniewski Joseph y Jones Roger; Robotic furniture texturing (US6330492); Century Furniture Ind; 2001.
- [19] Jianjun Wang, Hui Zhang y Thomas Fuhlbrugge; Improving machining accuracy with robot deformation compensation; ABB Technology Co; 2009.
- [20] "Development of a flexible and adaptive robotic cell for small batch manufacturing"; F. Vidal, M.Álvarez, R. González, I. Iglesias, R. Mouriño. IV International scientific conference Contemporary materials (Contemporary materials 2011), Banja Luka-Bosnia and Herzegovina. Vol. II(1) pages 5-12, ISSN: 1986-8669 (Print); 1986-8677 (Online).
- [21] "Development of a flexible and adaptive robotic cell for marine nozzles processing"; M.Álvarez, F.Vidal, R. González I.Iglesias. 17th IEEE International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETF A 2012), Krakow-Poland. Vol.II, page 1502-1510, ISBN: 978-1-4673-4736-5.
- [22] Briot S., Pashkevich A., Chablat D. Reduced elastodynamic modelling of parallel robots for the computation of their natural frequencies. 13th World Congress in Mechanism and Machine Science, 19 - 25 Juin, 2011, Guanajuato, Mexico.
- [23] Losada J.M, "Teoría de mecanismos y máquinas-Mecánica fundamental", Tórculo ediciones, ISBN 84-89641-42-0 (1995).
- [24] Mejri S., et al; "Experimental protocol for the dynamic modeling of machining robots"; 21ème Congrès Français de Mécanique Bordeaux, 2013.