

**UNIVERSIDAD DE OVIEDO**

**CENTRO INTERNACIONAL DE POSTGRADO**

**MASTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA**

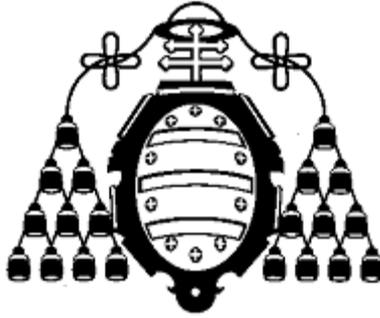
**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**MEJORA DE CÉLULA DE SOLDADURA DE ÁLABES**

**JULIO DE 2015**

**ALUMNO: RICARDO GRANDE SARRIEGO**

**TUTOR: DAVID BLANCO FERNÁNDEZ**  
**TUTOR: NILO FREIGENEDO CASARES**



**UNIVERSIDAD DE OVIEDO**

**CENTRO INTERNACIONAL DE POSTGRADO**

**MASTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**MEJORA DE CÉLULA DE SOLDADURA DE ÁLABES**

**JULIO DE 2015**

**Ricardo Grande Sariego**

**David Blanco Fernández**

# MEMORIA



## **AGRADECIMIENTOS**

Por la ayuda prestada a lo largo de todo el trabajo desarrollado, se hace obligatorio mostrar un profundo agradecimiento a:

- David Blanco Fernández
- Nilo Freigenedo Casares
- Jesús Morán Pando
- Javier Morán Fombona
- Oliver Menéndez Guardado
- Juan José Suárez Díaz
- Justo González Fernández
- Luis García Orviz
- Inés Tuero Menéndez
- Marco Arroyo Galán
- Ángel Sánchez Inguazo
- Jorge Sierra Borbolla
- Jose David Fernández
- Jacobo Pérez Fernández
- José Ángel Sirgo Blanco
- Ángel Hevia Cortina
- Amparo Sariago Hevia
- Alfonso C. Grande Sutil



## **RESUMEN**

El presente trabajo ha sido desarrollado durante la estancia en la empresa Zitrón S.A. y se ha centrado en la mejora de célula de soldadura de álabes allí disponible.

Inicialmente se ha procedido a un análisis del estado actual de la célula, en el cual se ha realizado un acopio de toda la información concerniente a la misma (planos constructivos mecánicos, diseño eléctrico y electrónico, sensórica involucrada, programación de los dispositivos controladores, normativa que le afecta), así como un análisis detallado in situ (inclusive en funcionamiento) posibilitando así un entendimiento completo de su funcionalidad y diseño. Además se ha modelado la mesa actual en el software utilizado por la empresa (Creo Parametric) para su posible aprovechamiento.

Posteriormente se ha procedido al planteamiento de posibles mejoras para la optimización de la funcionalidad de la célula. Para la implementación de las mismas y la consecución de un diseño adecuado se han evaluado las necesidades existentes en el proceso, para lo cual se ha dialogado con todas las partes relacionadas con la célula: diseñador mecánico, diseñador eléctrico y electrónico y operario habitual de la misma. Gracias a ello se han podido analizar los deseos y requerimientos y establecer un nexo común, que ha posibilitado el posterior diseño optimizado. Con todo ello, se procedió inicialmente al planteamiento de mejoras mínimas de la mesa existente actual, tras lo cual se decidió proponer un rediseño completo de la misma, en búsqueda de la mayor optimización posible.

Así, la tarea central del presente trabajo ha sido el diseño íntegro de la alternativa escogida para la optimización de la célula: diseño mecánico, eléctrico, electrónico (sensórica) y de programación. Para ello se han generado modelos 3D, planos constructivos, se han seleccionado componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos, se han diseñado los esquemas eléctricos para el correcto funcionamiento de la célula, y se ha procedido a la realización del programa necesario para los autómatas de control.

También se ha llevado a cabo el estudio de requerimientos así como un planteamiento de alternativas para el diseño de un utillaje de sujeción de álabes que permita la optimización del proceso de soldadura. No se ha llegado a desarrollar el diseño final por falta del tiempo para ello requerido en base a la complejidad del mismo.

Paralelamente se ha desarrollado un análisis del funcionamiento de la célula, tanto para la obtención de información útil para la optimización del diseño, como para generación de datos de interés para la empresa: se ha ejecutado un análisis de tiempos del proceso completo, así como la recopilación de las temperaturas alcanzadas en los álabes durante los procesos de soldadura. En ambos casos se ha procedido a la medición, análisis y resumen durante varios ciclos de trabajo.

Todo ello queda reflejado en la documentación del presente trabajo que aquí se introduce.

## **PALABRAS CLAVE**

Soldadura - Álabes - Célula - Ventilador - Posicionador - Robot



## ÍNDICE GENERAL: MEMORIA

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1.	OBJETO.....	1
1.2.	CONDICIONES DE DISEÑO.....	2
1.3.	REQUISITOS.....	2
1.4.	ALCANCE.....	2
1.5.	ORGANIZACIÓN DEL PROYECTO.....	4
1.6.	ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.....	4
<b>2.</b>	<b>MARCO DEL PROYECTO.....</b>	<b>5</b>
2.1.	ZITRÓN: LA EMPRESA.....	5
2.2.	VENTILADORES Y ÁLABES.....	5
2.2.1.	<i>Proceso de fabricación y soldadura.....</i>	<i>6</i>
<b>3.</b>	<b>ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>8</b>
3.1.	CÉLULAS DE SOLDADURA.....	8
3.1.1.	<i>Robots de soldadura.....</i>	<i>9</i>
3.1.2.	<i>Útiles de soldadura.....</i>	<i>10</i>
3.1.3.	<i>Mesas de posicionamiento.....</i>	<i>11</i>
3.2.	SOLDADURA MIG/MAG.....	13
3.3.	ACERO AISI-316L.....	18
<b>4.</b>	<b>RECOPIACIÓN DEL ESTADO ACTUAL DE LA CÉLULA.....</b>	<b>19</b>
4.1.	DESCRIPCIÓN GENERAL.....	19
4.2.	DESCRIPCIÓN DE FUNCIONAMIENTO.....	20
4.3.	MESA DE POSICIONADO DE ÁLABES.....	22
4.3.1.	<i>Diseño mecánico.....</i>	<i>23</i>
4.3.2.	<i>Actuadores.....</i>	<i>26</i>
4.3.3.	<i>Sensores.....</i>	<i>28</i>
4.4.	DISEÑO ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO.....	29
4.4.1.	<i>Esquema global.....</i>	<i>29</i>
4.4.2.	<i>Componentes electrónicos.....</i>	<i>30</i>
4.4.3.	<i>Componentes eléctricos.....</i>	<i>32</i>
4.5.	SEGURIDADES.....	34
4.5.1.	<i>Detector de presencia.....</i>	<i>34</i>
4.5.2.	<i>Vallado perimetral.....</i>	<i>35</i>
4.6.	CONTROL.....	36
4.6.1.	<i>Programa de control global.....</i>	<i>36</i>
4.6.2.	<i>Programa del relé de seguridad.....</i>	<i>38</i>
4.7.	ROBOT SOLDADOR.....	40
4.8.	ÚTIL DE SOLDADURA.....	42
4.9.	INTERACCIÓN MESA - ROBOT.....	43
<b>5.</b>	<b>ANÁLISIS.....</b>	<b>45</b>
5.1.	PUNTOS DÉBILES.....	45
5.2.	REQUERIMIENTOS, ESPECIFICACIONES Y DESEOS.....	47

<b>6.</b>	<b>MEJORA DE LA CÉLULA: ALTERNATIVAS</b> .....	<b>50</b>
6.1.	ADAPTACIÓN DE LA MESA EXISTENTE .....	50
6.1.1.	<i>Mejoras mínimas sencillas</i> .....	50
6.1.2.	<i>Uso de motores paso a paso</i> .....	51
6.1.3.	<i>Dotación de giro al utillaje</i> .....	51
6.2.	REDISEÑO COMPLETO.....	52
6.2.1.	<i>Mesa circular plana</i> .....	53
6.2.2.	<i>Mesa circular tipo revólver</i> .....	54
6.2.3.	<i>Mesa lineal</i> .....	55
6.2.4.	<i>Ménsula de doble raíl</i> .....	56
6.2.5.	<i>Ménsula lineal monorraíl</i> .....	57
6.2.6.	<i>Mesa circular vertical</i> .....	57
6.2.7.	<i>Ménsula circular vertical</i> .....	58
6.3.	RESUMEN DE ALTERNATIVAS .....	59
6.4.	VALORACIÓN DE ALTERNATIVAS .....	64
<b>7.</b>	<b>SOLUCIÓN ADOPTADA</b> .....	<b>67</b>
7.1.	CÁLCULO DE LA CAPACIDAD MÍNIMA .....	67
7.2.	DISEÑO MECÁNICO .....	68
7.2.1.	<i>Bastidor inferior</i> .....	69
7.2.2.	<i>Bastidor superior</i> .....	71
7.2.3.	<i>Pantalla de separación</i> .....	72
7.2.4.	<i>Sistema de volteo del utillaje</i> .....	74
7.2.5.	<i>Ventajas del diseño</i> .....	80
7.3.	SELECCIÓN DE ACTUADORES .....	81
7.3.1.	<i>Motorreductor</i> .....	81
7.3.2.	<i>Actuadores neumáticos</i> .....	82
7.4.	DISEÑO ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO.....	83
7.4.1.	<i>Armario de control</i> .....	83
7.4.2.	<i>Máquina</i> .....	84
7.5.	SENSORES.....	85
7.5.1.	<i>Barrera de detección de presencia</i> .....	85
7.5.2.	<i>Finales de carrera</i> .....	85
7.5.3.	<i>Sensores inductivos</i> .....	86
7.6.	DISEÑO NEUMÁTICO .....	88
7.7.	CONTROL .....	90
7.7.1.	<i>Implementación de la seguridad</i> .....	90
7.7.2.	<i>Programa de funcionalidad</i> .....	92
7.7.3.	<i>Descripción de señales</i> .....	102
7.7.4.	<i>Selección de velocidades de giro</i> .....	103
<b>8.</b>	<b>DISEÑO DE UTILLAJE</b> .....	<b>106</b>
8.1.	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ACTUAL.....	106
8.2.	ANÁLISIS .....	107
8.2.1.	<i>Puntos débiles</i> .....	108
8.2.2.	<i>Requisitos</i> .....	108
8.3.	ALTERNATIVAS .....	109
8.3.1.	<i>Sujeción por inserción</i> .....	109
8.3.2.	<i>Inserción parcial</i> .....	110
8.3.3.	<i>Adaptación de utillaje actual</i> .....	110
8.3.4.	<i>Doble cama</i> .....	111
8.3.5.	<i>Amarre puntual transversal</i> .....	111
8.4.	RESUMEN DE ALTERNATIVAS .....	112
8.5.	VALORACIÓN DE ALTERNATIVAS .....	116

<b>9. ESTUDIO DE CICLO DE TRABAJO.....</b>	<b>119</b>
9.1. ANÁLISIS DE TIEMPOS.....	119
9.1.1. Descripción del ciclo de trabajo.....	119
9.2. ANÁLISIS DE TEMPERATURAS.....	123
9.3. PLANIFICACIÓN DEL CICLO DE TRABAJO PARA EL DISEÑO PLANTEADO.....	124
<b>10. CONCLUSIONES.....</b>	<b>126</b>
10.1. DESARROLLO DE LAS TAREAS.....	126
10.2. LECCIONES APRENDIDAS.....	128
10.3. CONCLUSIONES FINALES.....	130
<b>11. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....</b>	<b>131</b>

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Ventilador con los álabes soldados en el proceso .....	7
Ilustración 2. Material de partida (izqda.) y álabe soldado y montado tras el proceso (dcha.) .....	7
Ilustración 3. Célula de manipulación y soldadura [soldimes] .....	8
Ilustración 4. Robot Fanuc de soldadura por arco de 6 ejes [Directindustry] .....	9
Ilustración 5. Equipamiento de soldadura de robot [Motoman].....	10
Ilustración 6. Antorcha de soldadura Robacta [Fronius] .....	10
Ilustración 7. Devanadora de hilo [mig-welding] .....	11
Ilustración 8. Mesa de posicionado de 2 ejes [machinetooltw].....	11
Ilustración 9. Mesa de posicionamiento de tres ejes [Assemblymag].....	12
Ilustración 10. Mesa de posicionamiento de 5 ejes [easomeng] .....	12
Ilustración 11. Partes fundamentales del proceso de soldadura MIG/MAG [Ingemecánica] .....	14
Ilustración 12. Modos de transferencia [Construsur].....	15
Ilustración 13. Equipo necesario básico para soldadura MIG/MAG [Ingemecánica].....	15
Ilustración 14. Diferentes soldaduras en ángulo [Soldadura de los aceros, M. Reina Gómez].....	17
Ilustración 15. Célula de soldadura de Zitrón (izqda.) y robot KUKA KR16 (dcha.) .....	19
Ilustración 16. Álabes preparados para ser soldados (izqda.) y estación de carga vacía (dcha.) .....	20
Ilustración 17. Volteo de la mesa (izqda.), robot a punto de soldar (centro) y volteo de estación (dcha.).....	21
Ilustración 18. Álabe soldado .....	21
Ilustración 19. Modelo 3D de mesa posicionadora .....	22
Ilustración 20. Bastidor y brazo actuado por motorreductor (izqda.) y y estación porta-álabes (dcha.).....	23
Ilustración 21. Estación individual y su motorreductor .....	23
Ilustración 22. Utilillaje de fijación de álabes en posición de carga (izqda.) y en posición de soldadura (dcha.).....	24
Ilustración 23. Cilindro de fijación de la mesa global (izqda.) y de cada estación individual (dcha.) .....	25
Ilustración 24. Sistemas renovados de acoplamiento y fijación del utilillaje porta-álabes .....	25
Ilustración 25. Motorreductor de volteo general (izqda.) y de estación individual (dcha.).....	26
Ilustración 26. Cilindro neumático de estación porta álabes.....	27
Ilustración 27. Electroválvulas neumáticas (izqda.) y su esquema (dcha.) .....	27
Ilustración 28. Final de carrera de seguridad .....	28
Ilustración 29. Sensor inductivo de alcance de posición.....	29
Ilustración 30. Fuente de alimentación, autómata de seguridad y PLC de control .....	30
Ilustración 31. Convertidor de frecuencia .....	31
Ilustración 32. Cuadro eléctrico de la célula.....	32
Ilustración 33. Dispositivos de seguridad del cuadro eléctrico.....	32
Ilustración 34. Relés bipolares.....	33
Ilustración 35. Contactores de seguridad para los motores .....	34
Ilustración 36. Termostato para activación del ventilador extractor .....	34
Ilustración 37. Detector de presencia (izqda.) y su emplazamiento en la célula (dcha.).....	35
Ilustración 38. Vallado perimetral y puerta de acceso controlada .....	35
Ilustración 39. Ejemplo de programación en lenguaje LADDER implementada en el PLC .....	36
Ilustración 40. Diagrama de estados de la programación actual de la célula .....	38
Ilustración 41. Evaluación del estado de la seta de seguridad y multiplexado .....	39
Ilustración 42. Sección de evaluación de la barrera de seguridad.....	39
Ilustración 43. Control de seguridad de estaciones .....	40
Ilustración 44. Robot KR16 L6-2 y sus grados de libertad.....	40
Ilustración 45. Espacio de trabajo del robot KR16 L6 [Kuka Robots] .....	41
Ilustración 46. Equipamiento para instalaciones automatizadas [Fronius] .....	42
Ilustración 47. Unidad de potencia y alimentador de electrodo [Fronius] .....	42
Ilustración 48. Antorcha de soldadura [Fronius] .....	43
Ilustración 49. Dotación de giro a los utilillajes.....	52
Ilustración 50. Mesa circular plana con volteo por sistema mecánico .....	53
Ilustración 51. Mesa circular plana con volteo mediante actuador auxiliar .....	53

Ilustración 52. Mesa tipo revólver con volteo por sistema mecánico.....	54
Ilustración 53. Mesa tipo revólver con volteo mediante actuador adicional .....	55
Ilustración 54. Mesa lineal .....	55
Ilustración 55. Ménsula de doble raíl .....	56
Ilustración 56. Mecanismo de soporte de los utillajes .....	56
Ilustración 57. Ménsula lineal monorraíl .....	57
Ilustración 58. Diseño de mecanismo porta utillajes.....	57
Ilustración 59. Mesa circular vertical.....	58
Ilustración 60. Ménsula circular vertical.....	58
Ilustración 61. Diseño optimizado de la célula de soldadura de álabes .....	67
Ilustración 62. Mesa posicionadora de álabes diseñada .....	69
Ilustración 63. Bastidor inferior .....	70
Ilustración 64. Gama de corona de giro (izqda.) y bola de transferencia (dcha.) elegidas .....	70
Ilustración 65. Bastidor superior .....	71
Ilustración 66. Sistema de fijación del cubo de pivotamiento del utillaje .....	71
Ilustración 67. Pantalla sin refuerzos (izqda.), con refuerzos perimetrales (centro) y en cruz (dcha.).....	72
Ilustración 68. Restricciones y cargas impuestas en los análisis .....	73
Ilustración 69. Deformación de pantalla sin refuerzo(izqda.),con refuerzo perimetral(centro) y en cruz (dcha.) .....	73
Ilustración 70. Inicio de giro (izqda.) y aproximación a posición inicial (dcha.) .....	74
Ilustración 71. Posición de soldadura 1 (izqda.) y detalle de indexado (dcha.) .....	74
Ilustración 72. Volteo (izqda.) y posición de soldadura 2 (dcha.).....	75
Ilustración 73. Puesta en posición horizontal (izqda.) y llegada a zona de descarga en posición (dcha.) .....	75
Ilustración 74. Sistema de transmisión de giro al utillaje.....	76
Ilustración 75. Sistema de volteo e indexado .....	77
Ilustración 76. Componentes del conjunto de volteo e indexado .....	78
Ilustración 77. Pie soporte de la unidad de volteo e indexado, y grupo de electroválvulas .....	78
Ilustración 78. Guía de puesta en posición de soldadura.....	79
Ilustración 79. Guía para posición de carga y descarga .....	79
Ilustración 80. Conjunto motorreductor de la gama del elegido .....	82
Ilustración 81. Actuador neumático de giro RCM-20 elegido .....	82
Ilustración 82. Ubicación de barrera de detección de presencia.....	85
Ilustración 83. Ubicación de los finales de carrera .....	86
Ilustración 84. Ubicación del sensor inductivo de detección de posición de soldadura .....	87
Ilustración 85. Detalle de ubicación del sensor inductivo de detección del álabe.....	88
Ilustración 86. Diseño del circuito neumático .....	89
Ilustración 87. Simulación de funcionamiento de los actuadores neumáticos .....	90
Ilustración 88. Programa de implementación de la seguridad en G9SP.....	91
Ilustración 89. Diagrama de estados global .....	95
Ilustración 90. Estado inicial (izqda.) y de parada de emergencia (dcha.) .....	96
Ilustración 91. Superestado de "Armado" y de "Error" por fallo de motor .....	96
Ilustración 92. Condición de transición al estado de "Carga/Descarga" .....	97
Ilustración 93. Estado de "Carga/Descarga" y transiciones al "Ciclo Normal" .....	98
Ilustración 94. Estado de "Ciclo Normal" .....	99
Ilustración 95. Ejemplo de pseudo-código generado .....	101
Ilustración 96. Ejemplo de traducción al lenguaje de contactos del CP1L de OMRON .....	102
Ilustración 97. Utillaje actualmente empleado cargado (izqda.) y descargado (dcha.) .....	106
Ilustración 98. Detalle del sistema de bloqueo por palanca .....	107
Ilustración 99. Detalle de sistema de fijación de pestaña (izqda.) y ejemplos de pestañas troqueladas (dcha.).....	107
Ilustración 100. Sujeción por inserción. Fijación mediante brida (izqda.) y utillaje específico (dcha.).....	109
Ilustración 101. Utillaje de inserción parcial.....	110
Ilustración 102. Adaptación del utillaje actual con una (izqda.) y dos bridas axiales (dcha.) .....	111
Ilustración 103. Sustentación por doble cama .....	111
Ilustración 104. Amarre puntual transversal .....	112
Ilustración 105. Termómetro láser empleado (izqda.) y zona del álabe en que se ejecuta la medición (dcha.) .....	123

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición química del acero AISI 316L.....	18
Tabla 2. Propiedades físicas del acero AISI 316L.....	18
Tabla 3. Eventos y señales.....	37
Tabla 4. Acciones.....	37
Tabla 5. Estados.....	37
Tabla 6. Señales de interacción mesa - robot.....	43
Tabla 7. Pineado del conector mesa - robot.....	44
Tabla 8. Lista de exigencias y deseos para la mejora de la célula.....	48
Tabla 9. Resumen de alternativas de diseño de mejora de la mesa posicionadora.....	60
Tabla 10. Valoración de criterios para selección de alternativa óptima.....	65
Tabla 11. Eventos y señales del funcionamiento de la célula.....	92
Tabla 12. Acciones del diagrama de estados.....	93
Tabla 13. Estados del diagrama StateChart.....	94
Tabla 14. Estados de historia del StateChart.....	94
Tabla 15. Señales de funcionamiento de la célula.....	102
Tabla 16. Resumen de alternativas de diseño del utillaje porta-álabes.....	113
Tabla 17. Resumen de valoración de criterios para alternativas de utillajes.....	117
Tabla 18. Registros de tiempos del ciclo de trabajo.....	121
Tabla 19. Valores registrados de temperatura.....	124

# 1. INTRODUCCIÓN

El presente proyecto se centra en el estudio de una célula robotizada de soldadura de álabes presente en la empresa Talleres Zitrón, sita en Gijón, Asturias, y la ejecución de los diseños pertinentes en el marco de la mecatrónica para su mejora y optimización.

El proyecto ha sido desarrollado como trabajo fin de Máster en Mecatrónica por Ricardo Grande Sariego bajo la supervisión de Nilo Freigenedo Casares, como tutor de empresa, y David Blanco Fernández, por parte de la universidad.

En la empresa se dispone actualmente de una célula de soldadura MIG-MAG para álabes, implementada a través de un brazo robótico KR16 L6-2 de la marca KUKA. Cada álabe se fabrica a partir de dos piezas cuya soldadura se implementa en una mesa posicionadora con giro automatizado. Se trata por tanto de un proceso industrial que posibilita la ejecución de un trabajo preciso y repetitivo de manera eficiente. Se dispone de dos sistemas principales automatizados interconectados: robot soldador – mesa de volteo.

## 1.1. Objeto

El objetivo fundamental consiste en la optimización de la célula actual a través de un estudio intensivo de los diferentes aspectos determinantes que la componen, para plantear posteriormente las mejoras susceptibles de ser aplicadas, o incluso el replanteo del diseño global, buscando siempre el máximo beneficio para la empresa. Se pretende por tanto mejorar aspectos de importancia y por tanto serán puntos a tratar los siguientes:

- Maximización de la calidad del producto final
- Mejora de las condiciones de trabajo del operario de la célula
- Minimización del trabajo manual
- Optimización del ciclo de trabajo

Serán pues objeto del presente proyecto las tareas que a continuación se enumeran:

1. **Recopilación y registro del estado actual de la célula:** desde su instalación la célula ha sufrido ciertas modificaciones por lo que la primera tarea consiste en la generación de una documentación detallada del estado actual a todos los niveles constructivos. Serán tareas a realizar:
  - a. Modelado 3D de la célula
  - b. Generación de planos as built (si fuera preciso)
  - c. Identificación de componentes electromecánicos, electrónicos y sensores
  - d. Generación de lista de componentes
2. **Desarrollo de mejora de mesa de posicionamiento:** la precisión del posicionamiento de la mesa menosprecia el nivel ofrecido por el robot, debido a la implementación rudimentaria de los sistemas de sensorización. El objetivo es plantear e implementar posibles mejoras en el sistema de posicionamiento.
3. **Diseño de utillajes para la ejecución de soldadura completa:** para aprovechar al máximo la calidad de soldadura ofrecida por el robot se busca diseñar un utillaje que

permita la ejecución de la soldadura no sólo perimetral, si no también transversal del extremo del álabe, eliminando consecuentemente las necesidades de operación manual.

- 4. Desarrollo de plan de ruta para la fabricación:** para la optimización máxima se desarrollará un estudio de tiempos de trabajo, y se tratará de adaptar el diseño optimizado de la célula para la consecución de la máxima productividad. Quedan abiertas propuestas de mejora de programación.

## **1.2. Condiciones de diseño**

La instalación estudiada ha sido diseñada para la soldadura de las piezas que forman los álabes de los ventiladores producidos en la empresa. Para ello se emplea un robot KR16 L6-2 de la marca Kuka. Para el aprovechamiento máximo del robot, se ha diseñado una mesa de posicionamiento que permite la soldadura de cuatro álabes en cada ciclo de trabajo. La mesa permite además la carga, paralelamente al trabajo del robot, de una nueva serie de álabes en la estación simétrica dispuesta.

Los álabes deben ser soldados a lo largo de dos perfiles superior e inferior, por lo que la mesa posibilita además el giro de los mismos para adecuar su posición a la del soldador.

Para el aprovechamiento máximo de la precisión ofrecida por el robot la mesa debe poseer una precisión intrínseca en su posicionado con un desvío respecto a la posición por defecto inferior a 0,05 mm. El útil de soldadura montado sobre el robot y su sistema de limpieza son de la marca Fronius.

## **1.3. Requisitos**

En base a los condicionantes de diseño y a la búsqueda de la optimización máxima de la célula, se desprenden requisitos básicos como:

- Robot Kuka KR16 L6-2 como fundamento de la célula
- Error de posicionado máximo de álabes inferior a 0,05mm
- Productividad diaria mínima de 120 álabes
- Tiempo máximo empleado por ciclo: 30 minutos / 8 álabes
- Capacidad mínima de carga de 4 álabes por estación
- Posibilidad de soldadura de, al menos, dos de los perfiles del álabe
- Reducción máxima del trabajo manual por parte del operario sobre la célula
- Aprovechamiento máximo del diseño disponible de la mesa de posicionado

## **1.4. Alcance**

El resultado final a obtener del presente proyecto es una mejora de la célula robotizada de álabes dispuesta en Zitrón, involucrando todos los niveles mecatrónicos necesarios: diseño mecánico, eléctrico, electrónico así como su componente sensórica y de actuadores, incluyéndose también la programación de los dispositivos programables involucrados. El alcance del proyecto incluye desde el estudio preliminar de la célula, hasta la propuesta de las diferentes mejoras necesarias para su aprovechamiento máximo, incluyendo ingeniería básica, de detalle, selección de

componentes, diseño de la programación necesaria, así como la presentación del mismo conjuntamente con la documentación asociada.

La célula desarrollada tendrá capacidad de soldadura de, como mínimo, cuatro álabes por ciclo de trabajo, desarrollando el proceso de soldado en, al menos sus perfiles superior e inferior. El espacio de trabajo en el que se desarrollará la innovación será el confinado en el layout de la célula existente, o dentro del espacio disponible en el taller reservado para la célula tratada.

La base de la célula será el robot disponible de la marca Kuka, serie KR16-L6-2, con útiles de soldadura y limpieza de la antorcha de la marca Fronius. La otra componente fundamental de la célula será la mesa de posicionado de álabes diseñada para tal cometido. Para su movimiento se emplearán accionamientos eléctricos (como motorreductores), neumáticos o hidráulicos.

Los materiales a utilizar serán acero estructural S275-JR y otros metales apropiados en base a los requerimientos de fabricación (por ejemplo F1110). La fabricación de piezas, en caso de ser requerida, será realizada en la propia empresa.

La programación de la mesa de posicionado de álabes será desarrollada sobre el software propio de los dispositivos lógicos seleccionados, en base a lógica digital.

Para la detección de los movimientos de la mesa se emplearán, en la medida de lo posible, sensores de tipo mecánico e inductivo, como los ya empleados en la mesa actual.

Se dispondrá de un cuadro eléctrico ubicado en la célula sobre el que serán instalados todos los elementos que otorguen los niveles de seguridad requeridos.

A continuación se detallan los trabajos desarrollados en el proyecto:

- Estudio preliminar de la célula de soldadura existente y su funcionamiento
- Recopilación del estado actual de la célula: diseño mecánico, eléctrico, electrónico, sensorización y accionamientos.
- Estudio de requisitos de funcionamiento de la célula
- Planteamiento de alternativas para la mejora de la célula, selección y diseño detallado de la misma
- Diseño mecánico detallado de la célula (existente y mejorada) en software de diseño 3D
- Análisis de esfuerzos necesarios para optimización del diseño
- Generación de planos de la célula mejorada
- Selección de los elementos comerciales mecánicos precisados
- Diseño electrónico requerido para desarrollo de la funcionalidad de la célula
- Selección de componentes comerciales electrónicos
- Selección de los sensores adecuados para el desarrollo de la correcta precisión
- Selección de los actuadores óptimos para la implementación de la funcionalidad
- Diseño eléctrico adaptado a los requerimientos y resto de diseño
- Generación de planos eléctricos pertinentes
- Diseño del programa de control requerido para el adecuado funcionamiento de la célula mejorada
- Estudio previo del utillaje de soporte de álabes
- Planteamiento de alternativas para sustentación del álabe y soldadura de la punta

- Análisis del ciclo de trabajo de la célula robotizada de soldadura de álabes
- Estudio de la ruta de trabajo desarrollada
- Otros análisis relevantes del proceso de trabajo (ej. análisis de temperaturas alcanzadas)

### **1.5. Organización del proyecto**

El proyecto es desarrollado por Ricardo Grande Sariego como alumno del Máster de Mecatrónica bajo la tutela de Nilo Freigenedo Casares como tutor de la empresa y David Blanco Fernández por parte de la universidad.

### **1.6. Estructura de la memoria**

La organización de la memoria presentada como documentación descriptiva del presente proyecto se estructura en:

- Introducción: apartado de descripción de forma genérica del proyecto sus objetivos y su alcance. Se realiza además una breve introducción al ámbito de desarrollo del mismo.
- Estado del conocimiento: sirve para la ubicación del ámbito del proyecto, la empresa y el entorno en que se desarrolla así como los elementos a los que concierne. Se realiza además una breve descripción del estado del arte en lo referente a células robotizadas, y específicamente diseñadas para la soldadura.
- Recopilación del estado actual de la célula: en lo que compone el primer apartado del proyecto, se realiza la descripción del estado actual de la célula sobre la que se trabaja, abarcando todos los ámbitos mecatrónicos involucrados.
- Análisis de la célula: con la información máxima recopilada, se procede a un análisis de los puntos fuertes y débiles de la célula para posibilitar el planteamiento de mejoras y alternativas.
- Alternativas de diseño de mejora: se procede en este apartado al planteamiento de las diferentes alternativas susceptibles de ser aplicadas en la mejora de la célula, así como a su evaluación y selección de la opción idónea.
- Solución adoptada: diseño de mejora de la célula: apartado en el que se desarrolla la tarea fundamental ejecutada en el proyecto, esto es, el desarrollo del diseño mejorado de la mesa de posicionamiento de álabes para su soldadura. Se explica aquí el diseño mecatrónico íntegro planteado.
- Planteamiento de utillaje perfeccionado: en este capítulo se desarrolla el estudio para la optimización de la sustentación y posicionamiento de los álabes para su soldadura, así como las diferentes alternativas generadas, y su evaluación.
- Estudio de ciclo de trabajo: en este capítulo se desarrolla el trabajo realizado en lo referente al estudio del ciclo de funcionamiento de la célula y otros datos relevantes evaluados.
- Conclusiones

## **2. MARCO DEL PROYECTO**

Se procede a continuación a la presentación del ámbito de trabajo en que se desarrolla el presente proyecto, así como del proceso objeto de estudio.

### **2.1. Zitrón: la empresa**

Zitrón es una empresa fundada en 1963, líder en el sector de los sistemas de ventilación. Su actividad se dedica fundamentalmente al diseño, construcción e instalación de sistemas de ventilación para túneles de diversos ámbitos: carreteros, de metro, para tráfico ferroviario, en minas o para dar servicio durante la construcción de infraestructuras como túneles o incluso canales de agua.

Algunas de sus obras más destacadas son el túnel del Guadarrama, el de la calle 30 de Madrid, o el de San Pedro, para un túnel con tráfico ferroviario.

Su actividad comprende todas las fases del proceso de creación de ventiladores: desde su diseño hasta su instalación pasando por las fases de fabricación, montaje, calibrado, acabado y, una de las más importantes: su evaluación en los bancos de ensayo.

Uno de los activos de más valor de la empresa asturiana es la calidad asegurada de sus equipos a través del rodaje y evaluación de los mismos. Para ello Zitrón posee dos bancos de ensayo: uno de ellos es el más grande del mundo para el ensayo de ventiladores, con una sección de 52 m<sup>2</sup>. Este banco es utilizado para pruebas de prototipos, obtención de curvas características de los ventiladores y comprobaciones ante el cliente. El otro banco (más sencillo), es utilizado para la comprobación de parámetros como las temperaturas, velocidades, o vibraciones alcanzadas por los ventiladores.

Zitrón posee representación en 4 de los 5 continentes del mundo, y tiene oficinas propias en Chile, India, Holanda, Turquía, Rusia y Australia.

El proceso que se lleva a cabo en Chile e India consiste en el montaje y rodaje de los componentes fabricados en Gijón y posteriormente enviados. Zitrón envía el producto completamente terminado a Australia, ya que la mano de obra y proveedores allí presentan un coste más elevado que el del transporte de los equipos desde la sede asturiana.

### **2.2. Ventiladores y álabes**

Zitrón se dedica principalmente a la fabricación de ventiladores axiales y de chorro (axiales con álabes fijos). La diferencia fundamental entre ambos es que mientras los ventiladores de chorro, debido a su configuración sólo permiten trabajar con una única curva característica, los ventiladores con álabes móviles permiten el trabajo con múltiples curvas caudal-presión.

Es importante por tanto identificar las partes fundamentales de un equipo para el desarrollo de la explicación del proceso llevado a cabo por la empresa. Así pues, un ventilador completo común estará formado por las siguientes partes:

- Carcasa
- Ventilador
- Directrices
- Motor

La propia máquina considerada como ventilador está compuesto a su vez por dos partes básicas: el rodete y los álabes, concerniendo éstos últimos de forma específica al presente proyecto.

Los álabes son fabricados mayoritariamente en aluminio fundido (aleación L2551) y acero (AISI-316L) bien por inyección (fabricados en Gijón) o bien en arena o coquilla (fabricados en el País Vasco). Posteriormente son mecanizados en los talleres de la empresa. Cabe reseñar que algunos ventiladores están siendo ya fabricados con álabes de fibra de carbono para la reducción de su peso y por tanto de la fuerza centrífuga generada. Sin embargo el principal hándicap que tiene el uso de este material es que, según la normativa vigente para ventiladores utilizados en la extracción de humos (como los instalados en cualquier túnel carretero) se exige una resistencia a temperaturas entre 200 y 400°C durante 2 horas. Es por ello que en determinadas situaciones se precisan aleaciones de muy alta calidad y propiedades térmicas y mecánicas, y la fibra de carbono no es aplicable en cualquier situación.

Los álabes pueden ir instalados de forma fija sobre los rodetes, sin posibilidad de variación de su ángulo, formando los comúnmente denominados ventiladores de chorro. En estos casos, los álabes son generalmente soldados al rodete.

Sin embargo la práctica más común es el montaje de álabes móviles en lo que constituyen los denominados ventiladores axiales, de modo que pueden ser reajustados para variar la orientación de los mismos, cambiando las prestaciones del ventilador y obteniendo así un mayor rango de funcionalidad.

El objeto fundamental de un ventilador es conseguir un aumento en la presión del gas que maneja. Ello se consigue fundamentalmente gracias al movimiento de los álabes. Sucede que a su paso por el ventilador, el gas adquiere además de un aumento en la presión, una variación en su energía cinética dado que se introducen una serie de componentes de velocidad (axial, circunferencial y rotacional). Sin embargo, el aporte de la velocidad rotacional al rendimiento es nula y tratará de recuperarse con elementos como las directrices. Es por esto que surge el concepto de *grado de reacción*: cociente entre la energía transferida en forma de presión y la energía total. De este modo el ideal para un ventilador sería un grado de reacción igual a 1, donde toda la energía transferida sería en forma de presión. Sin embargo en la realidad el grado de reacción será siempre menor a la unidad.

Para conseguir grados de reacción elevados, se precisa que la curvatura de los álabes sea elevada. Sin embargo, existen unos límites dado que a mayor curvatura, se produce la generación de una mayor zona de capa límite, que provoca desprendimientos del gas a su paso por el álabe generándose por ello ruidos, vibraciones y pérdida e rendimiento.

### **2.2.1. PROCESO DE FABRICACIÓN Y SOLDADURA**

Los álabes están formados por dos chapas de, por lo general, 1,2 mm de espesor fabricadas en acero inoxidable austenítico AISI 316L con una forma curvada. El proceso parte de la chapa plana recortada con un patrón de forma que configurará finalmente la geometría idónea. Tras ello se somete a un proceso de estampación que le confiere la curvatura apropiada según el diseño precisado. Con las dos mitades curvadas se procede a la ejecución del punteado manual de los elementos para mantenerlos en posición y posibilitar el posterior posicionado en la célula robotizada.



**Ilustración 1. Ventilador con los álabes soldados en el proceso**

Tras ello, se procede a la ejecución de la soldadura perimetral de ambos elementos para generar la pieza completa que posteriormente irá unida al rodete. El rango de dimensiones con las que se trabaja en la célula va desde álabes para ventiladores de 400mm de diámetro hasta aquellos empleados en ventiladores de 1200mm.



**Ilustración 2. Material de partida (izqda.) y álabes soldados y montado tras el proceso (dcha.)**

Para el conformado se precisa la ejecución de un cordón de soldadura MIG-MAG con aporte de material adicional. Se requiere por tanto una soldadura precisa que consiga ejecutar un álabes con un perfil aerodinámico óptimo que permita las mejores características aerodinámicas de la máquina. Sobre todo se exige que el proceso de soldadura no modifique en exceso la geometría diseñada para el perfil aerodinámico, evitando así discrepancias con respecto al diseño original. Para concluir se ejecuta la soldadura de la pieza de cierre de la punta del álabes de forma manual debido a carencia de un utillaje para el posicionado adecuado y la ejecución de la soldadura pertinente.

Tras la ejecución de un proceso de pulido del perfil perimetral para afinar su funcionamiento, el álabes queda conformado y listo para su montaje sobre el rodete. Este proceso se lleva a cabo mediante soldadura manual.

### 3. ESTADO DEL ARTE

Con objeto de evaluar el estado de la técnica en lo referente a las células automatizadas y, más concretamente, aquellas que desarrollan procedimientos de soldadura, se desarrolla el siguiente apartado. Sirve pues como base para fundamentar el conocimiento necesario para el desarrollo de las diferentes tareas planteadas en el presente proyecto.

#### 3.1. Células de soldadura

El empleo de células de soldadura está ampliamente extendido en el sector industrial debido a las ventajas que ofrece, sobre todo en el desarrollo de un cordón de soldadura uniforme y de muy alta precisión en comparación con el desarrollo manual del mismo. Adicionalmente, facilita la labor de soldado de grandes piezas y permite el desarrollo de elevadas velocidades de ciclo, consiguiendo así una productividad muy elevada. Existen sin embargo condicionantes y limitaciones en la implantación de este tipo de células, como el alcance máximo disponible o la necesidad de una correcta y óptima programación para aprovechar los beneficios de la misma.



**Ilustración 3. Célula de manipulación y soldadura [soldimes]**

En una célula de soldadura, además del robot, fundamento principal del módulo, se dispone de otros complementos adicionales para posibilitar el desarrollo de los procesos pensados para la misma. Suele tratarse de dispositivos que permiten la manipulación y manutención de los objetos tratados en la célula. Tienen una mayor o menor complejidad en función del proceso desarrollado. Típicamente permiten la carga y descarga de las piezas a tratar por parte del operario. Se dispone tradicionalmente de conjuntos posicionadores sobre los cuales se colocan los elementos a soldar. Los conjuntos, típicamente mesas, en combinación con el robot permiten el acceso a las zonas más críticas de soldadura.

Existe toda una gama comercial de dispositivos posicionadores ofrecidos por las propias casas de robots que pueden ser diseñadas y adaptadas en función de las necesidades del cliente.

La célula suele quedar completada con las unidades de control y gobierno tanto de robot como de los elementos adicionales mencionados. Se precisan también unidades de potencia capaces de

adaptar los niveles de energía necesarios para la misma. Típicamente se suele disponer de elementos de seguridad como setas de emergencia, además de quedar la célula confinada en el interior de un entramado vallado para imposibilitar el acceso de personal a la zona de trabajo durante el proceso. Estos elementos deben ser completados con dispositivos de detección de presencia, detección de apertura de puertas del vallado, etc.

### **3.1.1. ROBOTS DE SOLDADURA**

Los robots más típicamente empleados para la ejecución de tareas de soldado son los antropomórficos con entorno a 6 grados de libertad, que permiten así el alcance de todas las diferentes posiciones que habitualmente se precisan para el desarrollo de un cordón de soldadura. Esta maniobrabilidad permite además el trazado de trayectorias largas y complejas en el espacio, posibilitando así la soldadura de elementos con perfiles tan particulares como lo son los de los álabes.



**Ilustración 4. Robot Fanuc de soldadura por arco de 6 ejes [Directindustry]**

Por otro lado, estos robots se caracterizan también por capacidades de carga en un rango de varias decenas de kilogramos, dado que el único esfuerzo a soportar son los propios útiles de soldadura empleados, cuyo peso medio ronda los 2 kg. Las distancias máximas de trabajo más habituales precisadas en estas aplicaciones van desde los 700 mm hasta unos 3000 mm.

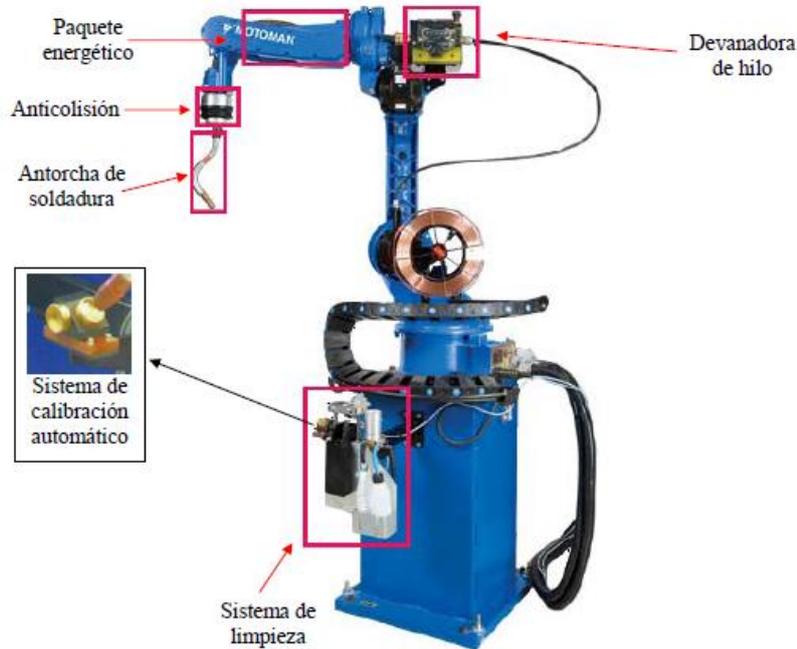
Parámetros críticos son las velocidades máximas de movimiento de cada eje, que posibilitan la optimización de los tiempos de los ciclos de trabajo. Las limitaciones en este campo vienen dadas por la durabilidad de los componentes mecánicos involucrados en los movimientos, que sufren con las aceleraciones e inercias y desgastes consecuentes.

Una de las características más importantes que deben ofrecer los robots empleados en el desarrollo de soldaduras es la repetibilidad, o grado de precisión con que pueden seguir la trayectoria fijada.

Los robots son diseñados explícitamente para aplicaciones de soldadura disponiendo así de configuraciones óptimas para el acoplamiento de los útiles requeridos para tales procesos. Un ejemplo claro son los robots con un último brazo hueco para alojamiento de la pistola y antorcha de soldadura, optimizando así el espacio precisado.

### 3.1.2. ÚTILES DE SOLDADURA

Para adaptar un robot genérico a la aplicación específica de soldadura se precisa la incorporación de una fuente de potencia capaz de transformar y generar los niveles adecuados de electricidad para el desarrollo de la misma, y de una pistola o antorcha para la aplicación final del electrodo a la zona a soldar.



**Ilustración 5. Equipamiento de soldadura de robot [Motoman]**

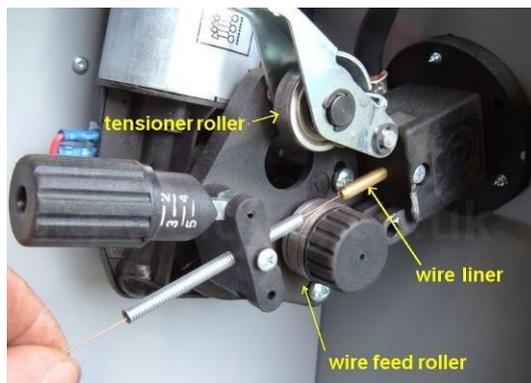
La fuente de potencia se encarga de generar la diferencia de potencial precisada para el establecimiento de un arco que genere la soldadura buscada. Se trata de equipos con compleja regulación interna para el control de la tensión e intensidad desarrolladas durante el proceso de modo que se habilita un sencillo control para el operario, consiguiendo a la vez la máxima calidad posible en la soldadura.

La antorcha es el elemento final de equipamiento, equivalente a una pistola manual de soldadura, adaptada para su acoplamiento al extremo del robot. Estos elementos son refrigerados mediante gas (el propio empleado en la soldadura) o por agua.



**Ilustración 6. Antorcha de soldadura Robacta [Fronius]**

A ella llega el hilo suministrado por una devanadora, consistente generalmente en una serie de rodillos que generan el avance del mismo.



**Ilustración 7. Devanadora de hilo [mig-welding]**

Se suelen acompañar además de sistemas de calibrado y de limpieza de la antorcha para conseguir el mantenimiento óptimo de los útiles en todo momento.

### **3.1.3. MESAS DE POSICIONAMIENTO**

La clasificación de los diferentes posicionadores empleados se realiza en base al número de ejes accionables de forma independiente y también al tipo de accionamiento empleado. Es práctica habitual la utilización de servomotores para un control preciso de los movimientos que complementa los del robot. Sin embargo también está extendido el empleo de actuadores neumáticos pese a que su precisión es inferior, ya que presentan ventajas como reducción de costes o simplicidad en el control.

Soluciones habituales son el empleo de mesas de un solo eje, actuado por un motor que puede ser embragable, permitiendo así la capacidad de rotación de la pieza sustentada en la misma. Este eje puede ser tanto horizontal como vertical, dependiendo del tipo de aplicación y soldadura precisada.

Otra configuración típica es la de mesas con dos ejes: horizontal y vertical. Este tipo de mesas suelen ser empleadas para el desarrollo de trayectorias complejas de soldadura que requieren el posicionado específico del útil.



**Ilustración 8. Mesa de posicionado de 2 ejes [machinetooltw]**

Con la adición de otro eje más surge una de las aplicaciones más extendidas: la habilitación de varias estaciones de trabajo independientes para permitir el desarrollo simultáneo de tareas de

manipulación y mantenimiento por parte del operario mientras el robot ejecuta su proceso sobre las piezas colocadas en la otra estación.



**Ilustración 9. Mesa de posicionamiento de tres ejes [Assemblymag]**

Se disponen mesas con mayor número de ejes, hasta 5, en las que se posibilita además del trabajo simultáneo en varias estaciones, una versatilidad extrema en el posicionado de las piezas tratadas. El incremento de ejes implica sin embargo un aumento exponencial de los costes debido a la multiplicación de los actuadores, sensores y controladores necesarios para el gobierno de todos los grados de libertad.



**Ilustración 10. Mesa de posicionamiento de 5 ejes [easomeng]**

### **Actuadores**

Los actuadores más comúnmente empleados en mesas posicionadoras son servomotores que posibilitan el perfecto posicionamiento del eje dentro de su rango de operación en base a la señal de gobierno emitida. Estos dispositivos incorporan además del propio motor, un reductor, una unidad de potencia y otra de control, de manera que los componentes quedan integrados en un único elemento. Se caracterizan por un consumo bajo y un control sencillo en base a modulación por ancho de pulso (PWM).

Extensamente empleados son también los motores paso a paso que permiten la colocación del eje en múltiples divisiones marcadas por la resolución propia del motor, en función de sus características. Se pueden conseguir movimientos extremadamente finos, habilitándose además

la posibilidad de enclavamiento en dichas posiciones. Son dispositivos específicamente válidos para posicionamiento de componentes.

Los motorreductores pueden ser también empleados en este tipo de aplicaciones aunque no son los elementos más típicos debido a la necesidad de un lazo de control adicional. Ofrecen sin embargo buenas características de par y velocidad no alcanzadas con otro tipo de elementos. Su sencillez constructiva implica la ausencia de sistemas integrados de control del movimiento o posicionamiento y es por ello que se precisa una componente adicional diseñada específicamente para la aplicación desarrollada que detecte los movimientos efectuados y, en base a ello, ejecute el gobierno preciso del motor.

Se encuentran también aplicaciones de mesas posicionadoras con actuadores lineales de tipo neumático o hidráulico, empleados en base a su sencillez, bajo coste, y facilidad de control. Precisan sin embargo, al igual que los motorreductores, de instalaciones que posibiliten la ejecución de un lazo de control adecuado para la descripción de los movimientos y el alcance de las posiciones deseadas.

### **Sensores**

En el caso de empleo de actuadores sin un control integrado de posicionamiento se hace preciso el empleo de sensores para la implementación del lazo. Los elementos más extensamente usados en este tipo de aplicaciones son los sensores final de carrera y los encoders.

Los finales de carrera sirven como detectores de alcance de posición, generalmente en base al cierre de un interruptor al contacto con el elemento detectado. Su configuración es extremadamente sencilla y permiten un control basado en lógica digital.

Los encoders son sensores de detección de giro basados también en principios digitales de funcionamiento. Se basan en fototransmisores y receptores que registran el giro del elemento mediante un tren de pulsos.

## **3.2. Soldadura MIG/MAG**

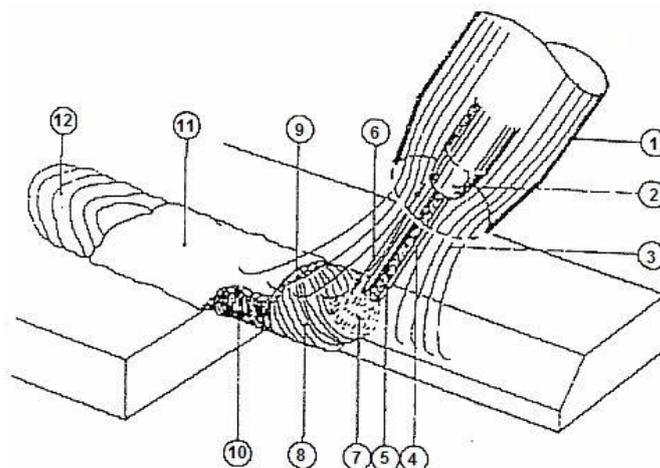
El fundamento de la soldadura MIG/MAG es el establecimiento de un arco eléctrico entre el electrodo, con forma de hilo continuo, y la pieza que es soldada. La protección del arco se ejecuta mediante un gas que puede ser activo (MAG) o inerte (MIG).

La principal ventaja del proceso de soldadura descrito consiste en la alta eficiencia tanto de material aprovechado como de tiempos requeridos debido al empleo de un hilo continuo de material de aporte. Con ello se consigue también una mayor continuidad en el hilo de soldadura, evitando concentraciones típicas de otros procedimientos. Otra de las características definitivas de este método es su facilidad de automatización, que lo hace idóneo para su aplicación en células industriales de soldadura.

### **Fundamentos**

Para la soldadura mediante este método se establece un arco eléctrico entre electrodo y pieza existiendo además una protección a través de un gas. La constitución de este gas: inerte o activo es el que determina las características específicas del proceso. En el primer caso (Metal Inert

Gas) no se genera participación en la reacción de soldadura por parte del gas y se aplica típicamente a todo tipo de metales, en el segundo (Metal Active Gas) por el contrario se produce la participación activa del gas aportado en la reacción, siendo su aplicación más usual la soldadura de aceros.



**Ilustración 11. Partes fundamentales del proceso de soldadura MIG/MAG**  
[Ingemecánica]

Para la generación del arco se emplea una corriente continua, existiendo la posibilidad usual de polarización directa o inversa. La regulación del arco generado por parte de los modernos equipos de soldadura posibilita el mantenimiento de una elevada constancia durante el procedimiento. Con ello se consigue que al regular la velocidad de alimentación de electrodo de forma proporcional a la intensidad de corriente necesaria para la soldadura, se mantenga siempre una distancia constante entre pieza y electrodo logrando un cordón de soldadura óptimo.

### **Modos de transferencia**

La transferencia de material de aporte a la pieza para la ejecución de la soldadura puede ser desarrollada por diferentes medios que dependen de las características eléctricas del proceso. Así los tipos principales distinguibles son:

- **Transferencia por cortocircuito:** en él se generan continuos cortocircuitos entre la gota de metal fundido y la pieza, extinguiéndose rápidamente el arco. Genera pues una soldadura con poca profundidad y es por ello ampliamente utilizado en piezas de pequeño espesor. Se suele emplear con gases de protección basados en CO<sub>2</sub> y sus mezclas con Argón.
- **Transferencia por arco globular:** el hilo se funde bajo un arco generando unas gotas de tamaño relativamente grande. No es un método empleado en la práctica, pero es el que aparece normalmente al efectuar el reglaje del equipo de soldadura.
- **Por spray:** se generan gotas de pequeño diámetro siguiendo la dirección del hilo, de manera que el cordón generado tiene un aspecto liso y con escasas proyecciones. Este modo es generado típicamente en el uso de argón y sus combinaciones como gas de protección.
- **Por arco pulsado:** este modo combina durante el proceso la aplicación de dos intensidades, una de carácter débil y aplicada ininterrumpidamente que mantiene el arco encendido, y otra aplicada a una frecuencia determinada de modo que se funde una gota

del mismo diámetro que el hilo del material de aporte. Es un método muy empleado hoy día que genera además una gran penetración.

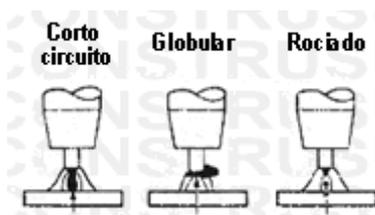


Ilustración 12. Modos de transferencia [Construsur]

## Equipo

El equipo básico para el desarrollo de la soldadura tipo MIG/MAG consta de un generador de corriente continua, depósitos de gases de protección, una unidad de alimentación del hilo electrodo continuo, pistola que ejecuta la soldadura, circuito de refrigeración y todos los órganos de control necesarios para el correcto desarrollo de la funcionalidad.

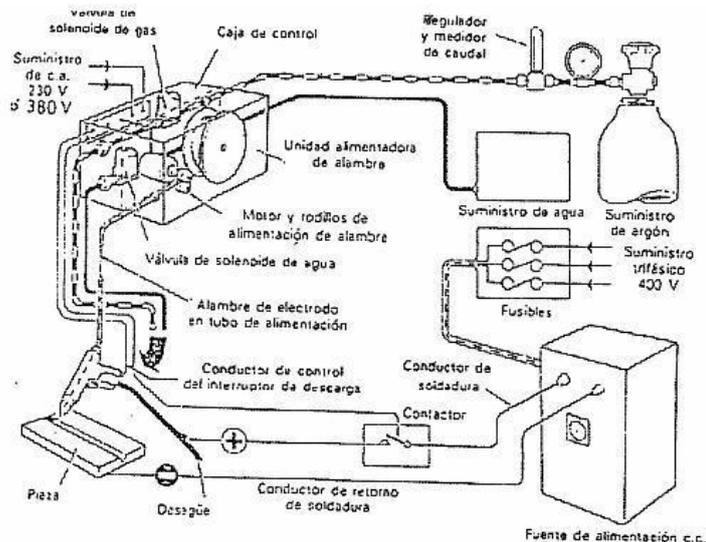


Ilustración 13. Equipo necesario básico para soldadura MIG/MAG [Ingemecánica]

El material de aporte emplea hilos continuos de material almacenados en bobinas. Se caracterizan además por estar normalmente recubiertos con una capa de cobre que permite la protección del metal contra corrosión durante su almacenamiento, facilita la conductividad eléctrica y disminuye los rozamientos durante el proceso.

Para el aporte del material se emplean dispositivos con rodillos de arrastre cuya forma varía en función de la dureza del electrodo manipulado.

## Gases de protección

En función del tipo de procedimiento desarrollado se emplea un tipo de gas u otro, siendo su composición determinante en el desarrollo de la reacción pertinente durante el proceso. Así, en el caso de soldadura de tipo MIG se emplea típicamente:

- Argón: idóneo para la soldadura de piezas de espesores pequeños debido a la buena estabilidad del arco generado. No puede ser empleado con aceros debido a que genera porosidad en la soldadura.
- Argón – Oxígeno: se añade oxígeno para mejorar la fluidez del baño y posibilitar así la compatibilidad del argón con piezas de acero
- Helio: Este gas genera una elevada conductividad que permite el desarrollo de cordones anchos. Su empleo no está muy extendido.

En el caso del procedimiento MAG las combinaciones típicamente empleadas son:

- Anhídrico carbónico (CO<sub>2</sub>): se caracteriza por su bajo coste, y su empleo casi exclusivo con aceros. Durante el proceso con este gas se generan gases tóxicos por lo que la atmósfera de trabajo debe ser controlada.
- Argón-anhídrico carbónico: la combinación con el argón aumenta la productividad del procedimiento, sin embargo incrementa su precio.

### **Parámetros de soldadura**

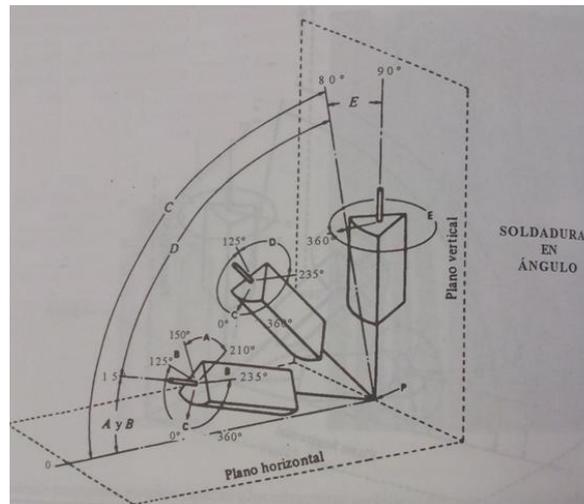
Los parámetros fundamentales que deben ser controlados en la aplicación del proceso para el desarrollo adecuado de la soldadura, y que por tanto influyen en la configuración de los robots habilitados para este procedimiento son:

- Intensidad de corriente: este parámetro se ve afectado por características como el grosor de la chapa a soldar, el diámetro del hilo de aporte, la posición de soldadura, etc. Los equipos de soldadura actuales incluyen una regulación automática de intensidad para conseguir un cordón de soldadura óptimo.
- Tensión: la definición de la tensión aplicada va a determinar el modo de transferencia y por ende, el grosor del cordón de soldadura. El rango de tensiones usual va desde los 14 a 40 VDC.
- Velocidad de arrastre del hilo: la velocidad a la que se aporta material es determinante para la soldadura, y en base a su configuración se ven afectados otros parámetros como la propia intensidad de corriente.
- Velocidad de arrastre de la pistola: la velocidad a la que se debe mover el útil de soldadura dependerá de parámetros como la posición en que se realice la soldadura, la forma del cordón precisado o la penetración buscada
- Caudal de gas: en función del gas de salida empleado se determina el caudal aplicado, valores típicos están comprendidos entre 14 y 16 litros por minuto

### **Posiciones de soldeo**

Fuerte influencia sobre el desarrollo de la soldadura tiene también la técnica aplicada en lo que al ángulo de pistola y avance de la misma se refiere. El ángulo de soldadura afecta a la forma y calidad del cordón, a su penetración y a la afectación térmica de la zona tratada. Existen por tanto diferentes posiciones entre las que destacan:

- Plana o sobremesa
- Horizontal o cornisa
- Bajo techo
- Vertical



**Ilustración 14. Diferentes soldaduras en ángulo [Soldadura de los aceros, M. Reina Gómez]**

Para la soldadura en ángulo o rincón típica de los álabes considerados se precisa una posición plana u horizontal tipos (A/B en la Ilustración 14) en la cual la inclinación óptima va comprendida entre 0-15°.

En base a la automatización del proceso, se debe buscar el ángulo óptimo de aplicación que pueda ser desarrollado de forma sencilla por el robot encargado de la operación.

Existen también diferentes posibilidades para el desarrollo del cordón en función de la trayectoria descrita por la pistola, existiendo variantes como: movimiento lineal para piezas de poco espesor, circular para piezas con tales geometrías o movimiento pendular para la realización de cordones muy anchos.

### **Concepto de energía de aportación**

La energía de aportación o (heat input) es el calor involucrado en el soldeo. Se denomina particularmente energía bruta aportada (EBA) y su importancia reside en la limitación establecida por el fabricante del material a soldar sobre este valor para el desarrollo de las propiedades óptimas del mismo.

Para el caso concreto de soldadura por arco eléctrico dicha energía puede ser calculada en base a la fórmula:

$$EBA (kJ/cm) = \frac{U(V) \cdot I(A) \cdot 60}{v(cm/min) \cdot 1000}$$

Son por tanto parámetros a controlar la tensión empleada en el proceso  $U$ , la intensidad  $I$ , y la velocidad de avance de la soldadura  $v$ .

### 3.3. Acero Aisi-316L

Se procede a continuación a la presentación del material que conforma los álabes que son soldados en la célula, que es un acero inoxidable austenítico, concretamente el AISI-316L, con una composición química definida según la siguiente tabla [18].

**Tabla 1. Composición química del acero AISI 316L**

%C	%Cr	%Ni	%Mo
0.03	16.5	10	2

La principal característica del material es su excelente resistencia a la oxidación en condiciones críticas de temperatura. Su límite elástico ronda los 240 MPa dependiendo del tipo de conformado y la temperatura de trabajo. Su capacidad de elongación es superior al 40%. En la siguiente tabla se presentan sus propiedades físicas principales:

**Tabla 2. Propiedades físicas del acero AISI 316L**

Densidad [kg/dm <sup>3</sup> ]	Conductividad térmica [W/mK]	Calor específico [J/kg K]	Resistencia eléctrica [Ω mm <sup>2</sup> /m]
7,98	15	500	0,75

Sus aplicaciones típicas se presentan en la industria química y farmacéutica, siendo por tanto también idóneo para su aplicación en sistemas de ventilación.

## 4. RECOPIACIÓN DEL ESTADO ACTUAL DE LA CÉLULA

En un primer paso se procede al análisis del estado actual de la célula de soldadura a todos los niveles: diseño mecánico, eléctrico, electrónico y componente sensórica. Se trata de la primera tarea planteada para el presente proyecto, cuyo objeto fundamental es generar y actualizar la base de datos de información referente a la célula existente en la empresa. Se busca además el perfecto entendimiento del diseño global de la misma para posibilitar su análisis detallado en búsqueda de potenciales mejoras.

### 4.1. Descripción general

La célula de soldadura se ubica en el taller de la empresa, en la zona de calderería. Está compuesta por tres componentes principales: el robot KR16 L6-2 de la marca Kuka, el equipo de soldadura de la marca FRONIUS, y una mesa de volteo fabricada en la propia empresa, que permite el posicionamiento óptimo de los álabes para el desarrollo de la soldadura necesaria para su fabricación.

En base al carácter comercial tanto del robot, como del equipo de soldadura, que rigidizan y limitan sus posibilidades de optimización, la parte potencialmente susceptible de mejoras de la célula resulta ser la mesa posicionadora. Es por ello que el foco principal del presente proyecto recae sobre su diseño mecatrónico y, consecuentemente, las principales mejoras serán planteadas en este ámbito.

La mesa existente consta de dos estaciones separadas 180°, que disponen a su vez de 4 dispositivos porta álabes cada una. Sobre ellos se colocan los álabes a soldar en la mejor posición para la ejecución del proceso por parte del robot. El dispositivo posee una capacidad de movimiento de giro global que posiciona las estaciones en la zona de actuación del robot, y en la de carga y descarga, respectivamente. Adicionalmente, cada estación dispone de un giro independiente que permite el desarrollo de la soldadura en los dos perfiles del álabe.



Ilustración 15. Célula de soldadura de Zitron (izqda.) y robot KUKA KR16 (dcha.)

El diseño automatizado de la instalación ha sido desarrollado por la empresa de robotización y automatización Hurtado Rivas, gestionando el diseño automático del conjunto global de la célula.

La célula de soldadura dispone además de los elementos de seguridad precisados requeridos para una máquina de este tipo, quedando así rodeada por un vallado perimetral, cuya zona de acceso incorpora una barrera electrónica de detección de presencia.

#### **4.2. Descripción de funcionamiento**

Se procede a continuación a la explicación global del ciclo de funcionamiento de la célula, para posibilitar su mejor entendimiento.

El ciclo comienza cuando el operario activa el funcionamiento en ciclo automático de la célula, tras lo cual coloca los álabes a soldar, que vienen ya punteados de otro puesto de trabajo de calderería, en los útiles de soldadura habilitados para tal efecto. Una vez sustentados mediante las pinzas de fijación, se acciona el pulsador de confirmación de piezas cargadas y preparadas para su soldadura.



**Ilustración 16. Álabes preparados para ser soldados (izqda.) y estación de carga vacía (dcha.)**

Habiendo acabado el proceso de soldadura de todas las piezas existentes en la estación en la zona de trabajo, el robot genera la orden de actuación sobre el motorreductor de la mesa de volteo, que gira completamente disponiendo las piezas cargadas por el operario en la zona de trabajo del robot.

A continuación el robot lleva a cabo la soldadura de la parte superior de los nuevos álabes, tras lo cual el robot se retira, generando la orden para el volteo del bastidor individual porta-álabes. El

motorreductor correspondiente entra en funcionamiento haciendo girar la estación hasta posicionar el perfil restante por soldar de forma accesible para el robot.



**Ilustración 17. Volteo de la mesa (izqda.), robot a punto de soldar (centro) y volteo de estación (dcha.)**

Finalizado el proceso completo de soldadura, el robot se retira para, con la orden de piezas cargadas dada por el operario, generar la orden de volteo de la mesa para disponer los álabes soldados al operario para su descarga y proceder a la repetición del ciclo de soldado con los nuevos álabes cargados.

Una vez el robot termina de soldar los álabes y con el ciclo total concluido, el operario debe dar una orden de giro de la mesa general para proceder a la descarga final de los últimos álabes.



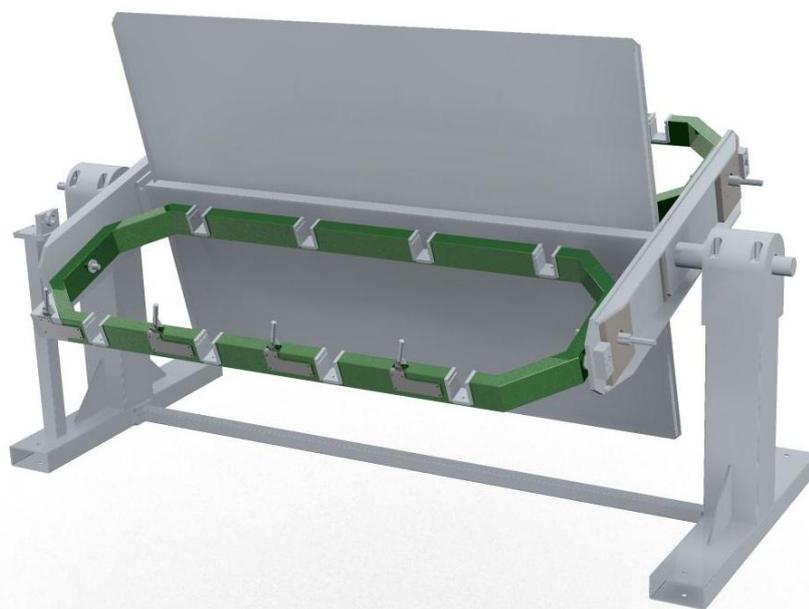
**Ilustración 18. Álabes soldado**

La célula dispone de un sensor de barrera de detección de presencia en la zona de carga, de manera que si el operario entra en la zona de carga o al interior de la célula, se lleva a cabo la detención inmediata del movimiento de la mesa en caso de encontrarse girando.

Otros parámetros a configurar en el ciclo de funcionamiento es por ejemplo la frecuencia de limpieza de la antorcha de soldadura, indicada mediante una variable adicional configurada por el usuario al comienzo del ciclo automático.

### **4.3. Mesa de posicionado de álabes**

Uno de los componentes más importantes de la célula es la mesa de posicionado de los álabes, que debe permitir al robot el correcto desarrollo de las tareas de soldadura previstas, aprovechando al máximo su precisión inherente. Se trata por tanto del principal punto susceptible de mejora de la célula, y es por ello que se procede a continuación a su descripción detallada a todos los niveles mecatrónicos, en lo que compone la primera tarea principal del proyecto, para posibilitar así su posterior análisis.



**Ilustración 19. Modelo 3D de mesa posicionadora**

La mesa fue diseñada en base el estado del arte de sistemas posicionadores, específicamente aquellas ofrecidas por la casa KUKA. Se desarrolló en Zitrón el diseño adaptado a la fabricación propia de la casa, tratando de optimizarlo al máximo. Un ejemplo claro de adaptación a las necesidades propias es la capacidad total elegida de 8 álabes, que es la cantidad típica que compone un ventilador completo.

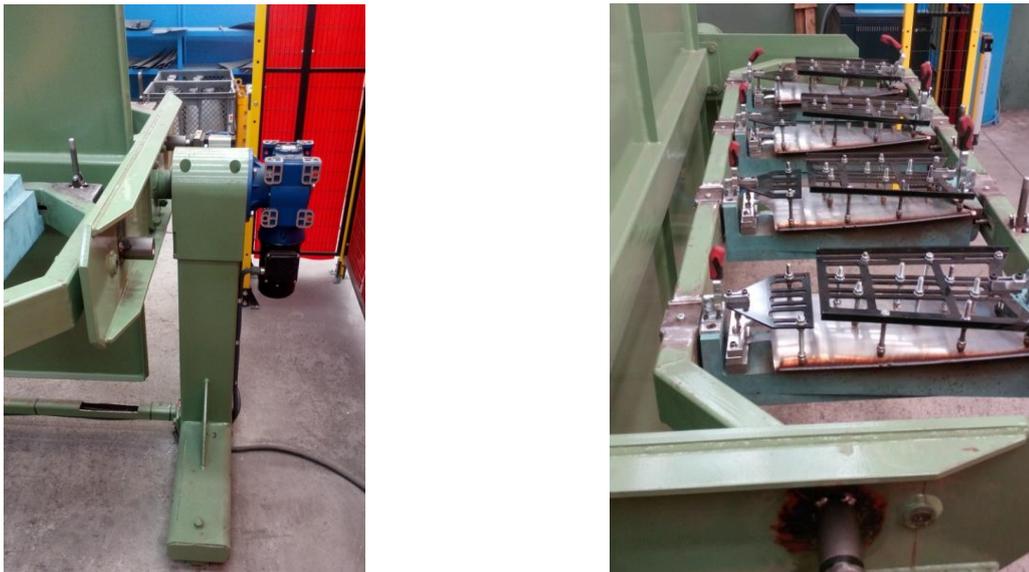
Para la implementación de la funcionalidad deseada la mesa dispone de un bastidor, sobre el cual pivota una mesa general en la cual se hallan, a su vez, dos bastidores porta álabes. Con ello se permite la carga y descarga de nuevos álabes en una de las estaciones al mismo tiempo que el robot trabaja sobre los ya cargados en la otra. Cada bastidor individual tiene capacidad de rotación para facilitar el soldado de los dos vértices del álabe. Tanto la mesa general como los bastidores porta álabes son accionados mediante motorreductores.

La mesa ha sufrido un proceso de reforma y mejora para tratar de paliar los déficits encontrados en su funcionamiento con el diseño original planteado, que también serán explicadas.

### 4.3.1. DISEÑO MECÁNICO

La mesa está formada por dos partes fundamentales como son: bastidor de soporte y mesa de volteo.

El bastidor está formado por perfiles tubulares de acero que, además de soportar a todo el conjunto, posibilitan el pivotamiento de la mesa general sobre su eje longitudinal. Se disponen para ello dos brazos principales sobre los que se acoplan las dos estaciones individuales. Estos se fijan a los soportes de pivotamiento habilitados para tal efecto en el bastidor de la mesa mediante dos ejes. Uno de ellos gira loco sobre su apoyo, mientras que en el otro el eje es pasante para su acople mediante chaveta al motorreductor.



**Ilustración 20. Bastidor y brazo actuado por motorreductor (izqda.) y estación porta-álaves (dcha)**

Como ya había sido introducido, se disponen dos bastidores similares para posibilitar el trabajo simultáneo de robot y operario. Cada bastidor está hecho con perfiles tubulares de acero sobre los cuales se instalan muñones de giro para permitir el acoplamiento y rotación de cada uno de los 4 utillajes de fijación de álabes de cada estación.

Los bastidores se fijan mediante ejes a los brazos exteriores. Cada bastidor se sustenta en un lado mediante un eje de giro loco, mientras que en el opuesto se dispone un eje con chavetero que recibe el movimiento generado por el motorreductor acoplado. Se posibilita con ello el giro de cada estación porta álabes de forma individual.



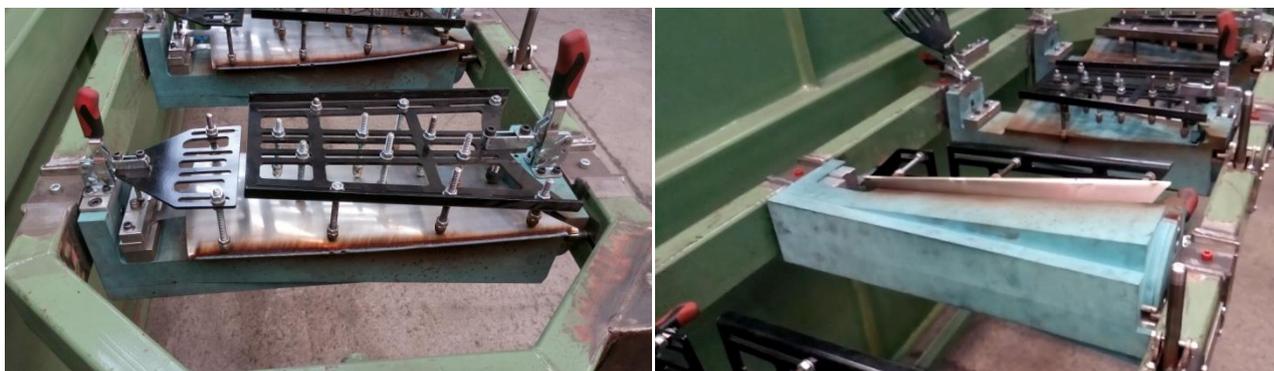
**Ilustración 21. Estación individual y su motorreductor**

Por motivos de seguridad se dispone de un panel separador metálico en posición perpendicular entre ambas estaciones que aísla al robot y su zona de trabajo de la de manipulación de álabes accesible por el operario. Dicho panel se une también a los brazos extremos.

### **Utillaje de álabes**

Sobre cada estación individual se instalan cuatro dispositivos que permiten la fijación de los álabes a soldar. Estos elementos constan de dos ejes en los extremos para su fijación sobre los muñones dispuestos en cada estación porta álabes. Ambos ejes soportan una matriz fabricada ad hoc sobre la cual es fijado el álabe a soldar, que dispone además de dos prensas para la fijación del mismo.

Los utillajes disponen por tanto de capacidad de rotación individual, de manera que la carga y descarga de álabes se realiza con el utillaje en posición horizontal, y finalizado este proceso, se giran para ubicarlos en posición transversal, permitiendo el acceso a los bordes a soldar.



**Ilustración 22. Utillaje de fijación de álabes en posición de carga (izqda.) y en posición de soldadura (dcha.)**

Para su fijación se dispone además de un dispositivo de enclavamiento tipo eje-agujero accionados manualmente por palanca que libera o bloquea la rotación del utillaje.

### **Reformas de la mesa de posicionamiento**

Tras la experiencia desarrollada con el dispositivo diseñado, se introdujeron dos mejoras principales: un sistema de fijación de los brazos en la posición de trabajo y una modificación del sistema de acoplamiento de los utillajes de álabes al bastidor. A continuación se procede a la descripción detallada de ambas.

Consecuencia del diseño pivotante planteado sobre un eje longitudinal, tanto para los brazos de la mesa, como para cada estación individual, y en base a la escasa capacidad de retención de los motorreductores, se generaban debido al peso y a las operaciones de trabajo, oscilaciones de la mesa, que generaban imprecisiones de importancia en el proceso de soldadura desarrollado.

Para asegurar la perfecta fijación tanto de la mesa de volteo como de cada estación individual durante el proceso de trabajo del robot, se incorporaron tres cilindros neumáticos adicionales. El método de fijación en los tres casos consiste en la inserción de un bulón actuado por el cilindro en un casquillo. El cilindro encargado de fijar la mesa completa se instala sobre un pie derecho adicional acoplado al bastidor, y el bulón se inserta en los casquillos soldados al brazo de la

mesa. Por su parte, las estaciones son fijadas mediante un cilindro instalado sobre el propio brazo que inserta su bulón en el orificio del casquillo instalado en el bastidor de la estación.



**Ilustración 23. Cilindro de fijación de la mesa global (izqda.) y de cada estación individual (dcha.)**

De esta manera, una vez situada la mesa en la posición de trabajo, se extienden los cilindros para realizar la fijación, de manera que ni el operario, ni el propio robot hagan oscilar a la mesa durante su operación.

Por otro lado, se modificó el sistema de fijación del utillaje de posicionamiento sustituyéndose los muñones cilíndricos en los que se insertaban los ejes por cajetines cuadrados fijados mediante una tapa superior apretada mediante tornillo, para facilitar así su desmontaje.

Por otro lado se modificó el sistema de bloqueo del giro del propio utillaje, pasando a emplearse un sistema basado en palanca y muelle, mostrado en la siguiente ilustración.



**Ilustración 24. Sistemas renovados de acoplamiento y fijación del utillaje porta-álabes**

### 4.3.2. ACTUADORES

Para la consecución de la funcionalidad precisada, la mesa dispone de actuadores de dos tipos: motorreductores eléctricos y cilindros neumáticos.

#### 4.3.2.1. Motorreductores

Se emplean un total de tres motorreductores, siendo de la marca AEG Electric Motors para el caso de la mesa general y CEMER para las estaciones individuales. En todos los casos su acoplamiento se hace mediante la brida del reductor al bastidor general y bastidor porta álabes respectivamente.



**Ilustración 25. Motorreductor de volteo general (izqda.) y de estación individual (dcha.)**

Para el giro de la mesa de volteo general se emplea un motor AEG de Electric Motors de 0,18 kW con una velocidad nominal de 1350 rpm. Incorpora una reductora de engranajes helicoidales de la marca SAGOX, modelo STM 80 con eje transversal.

Para el posicionado de cada estación porta álabes individual en sus posiciones extremas de soldado (giro de 180°) se dispone de dos motores de 4 polos CEMER de 0,12 kW de potencia, actuados a 230/400 VAC. Su velocidad nominal es de 1350 rpm, con un par aproximado de 0,84 Nm y es por ello que disponen de una reductora de la marca SAGOX para la adecuación a las demandas del movimiento final.

Para el control del movimiento de todos ellos se dispone de tres variadores de frecuencia de la marca Vacon que serán descritos en el apartado 4.4.2.3.

#### 4.3.2.2. Cilindros neumáticos

Con la reforma de la célula se han incorporado tres cilindros neumáticos para fijación de la mesa en posición en el momento de ejecución del proceso de soldadura. Los cilindros empleados son de la marca Waircom y son de doble efecto.



**Ilustración 26. Cilindro neumático de estación porta álabes**

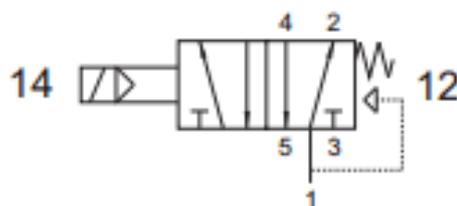
Se trata de cilindros de la serie DBU con referencia 32/60 DBUI/M8, con una presión máxima admisible de 10 bar. Son por tanto dispositivos de doble efecto, de 32mm de diámetro, con una configuración básica y con una carrera de 60mm.

#### 4.3.2.3. Electroválvulas

Para el gobierno de la funcionalidad de los cilindros se disponen tres electroválvulas de la marca AZ, modelo 521 ME que gestionan el flujo de aire para generar la eyección o retracción del vástago del cilindro correspondiente que fija la posición deseada.

Se trata de válvulas 5/2 electropilotadas y con retorno a posición inicial por muelle, por tanto disponen de 5 entradas/salidas de aire y 2 posiciones. En una posición se inyecta la presión de modo que el vástago se extiende y en la otra se hace de tal forma que se retrae, siendo la presión máxima admisible de 10 bares.

La señal que controla el manejo de dichas válvulas proviene del motorreductor relacionado con cada cilindro, de modo que al finalizar su movimiento, y tras un tiempo establecido de retardo, se genera la señal que actúa el cilindro para fijar la posición deseada.



**Ilustración 27. Electroválvulas neumáticas (izqda.) y su esquema (dcha.)**

### 4.3.3. Sensores

Para el control automatizado de la mesa se emplean dos tipos principales de sensores: finales de carrera mecánicos y sensores inductivos.

#### 4.3.3.1. Finales de carrera de seguridad

Sobre el bastidor general se instalan dos finales de carrera de la marca OMRON, con referencia D4N-4120 actuados por dos chapas de tope añadidas para tal efecto. El dispositivo es capaz de trabajar con tensiones de hasta 240 V. El empleo de dos chapas en lugar de una se fundamenta en la imposibilidad de colocar los sensores a la altura del eje de giro debido a la forma externa curvada del soporte de pivotamiento. Ello genera la necesidad de colocación de los sensores una distancia por debajo de dicho eje. Se hace por tanto necesario incrementar el desvío original de la chapa desde la posición horizontal, para conseguir la actuación del sensor cuando la mesa está paralela al suelo. Es por ello que se precisa un ángulo equivalente para la actuación del sensor del lado contrario, y por ello se emplean las dos chapas de actuación.



**Ilustración 28. Final de carrera de seguridad**

Se trata de finales de carrera que generan la señal de posición global de la mesa. Se controla con ellos la actuación del motor de volteo general, siendo detenido al ser alcanzadas las posiciones extremas. Su información permite además el bloqueo de la estación en la zona de trabajo del operario, evitando su giro y por tanto eliminando el riesgo de accidente.

Su salida se conecta al autómatas que desarrolla el control de la seguridad.

#### 4.3.3.2. Sensor inductivo

Para la detección de la posición de cada estación individual porta álabes se emplean sensores inductivos de la marca OMRON, con referencia E2A-M12KS04-W1-B1. Se trata de un sensor cilíndrico de proximidad que detecta materiales metálicos en un rango comprendido entre los 4 y los 30 mm. Requiere una tensión de alimentación comprendida entre 12 y 24V DC.



**Ilustración 29. Sensor inductivo de alcance de posición**

Para la detección se dispone de dos placas metálicas solidarias a la estación que permiten el registro por parte del sensor. El empleo de dos chapas es desarrollado para conseguir así un ajuste fino y corregir las asimetrías e inexactitudes inherentes a la fabricación y el montaje.

Estos sensores se encargan de generar la información necesaria de la posición de cada una de las estaciones individuales, posibilitando así el control apropiado de los motores que generan su volteo. Sus señales son enviadas al autómeta de control general.

## **4.4. Diseño eléctrico y electrónico**

Se procede a continuación a la descripción detallada del diseño eléctrico y electrónico dispuesto en la célula que posibilita la consecución de todas las funcionalidades mencionadas. Para ello se procederá inicialmente a la descripción de los elementos electrónicos principales (controladores lógicos programables, y otros dispositivos de control), para pasar posteriormente a la descripción de los componentes eléctricos de carácter más genérico (interruptores, contactores, fuentes de alimentación, etc.).

### **4.4.1. Esquema global**

En la célula de soldadura de álabes se dispone de un cuadro genérico al que llega una línea trifásica. De este cuadro general se genera la división de líneas para los tres grupos eléctricos principales involucrados en la célula: el robot KUKA y su cuadro de control, la mesa de posicionamiento y su cuadro, y el equipo de soldadura. Cada una de dichas líneas consta de los dispositivos generales típicos de protección: interruptor magneto térmico y diferencial, todos ellos de la marca Schneider Electric.

Debido a la focalización principal del presente proyecto en la mesa de posicionamiento, a continuación se describe detalladamente el diseño existente para la línea asociada a la misma.

Del cuadro general parte la línea trifásica protegida para alimentación de la mesa. Dicha toma alimenta por un lado a los variadores de frecuencia que a su vez accionan a los motores, y por otro proporciona la línea monofásica para suministro del resto de componentes de la célula. Esta línea monofásica, tras su paso por un interruptor magneto-térmico, se conecta a la fuente de alimentación que generará el nivel típico de 24VDC precisado en la mayoría de componentes electrónicos. Por otro lado, línea monofásica alimenta también al ventilador de extracción instalado en el propio armario.

De la fuente de alimentación se extraen los 24VDC necesarios para los diferentes componentes que a continuación se enumeran. Uno de los ellos es el autómeta de seguridad G9SP que se

encarga de la verificación del estado correcto de todos los dispositivos de seguridad habilitados en la célula: barrera de detección de paso, finales de carrera de seguridad, seta de emergencia, etc. En base a la lógica programada en él se generan señales de permiso de funcionamiento para el resto de componentes de la célula en caso de que la situación sea adecuada, o de fallo en su defecto. Este dispositivo gestiona también los contactores que permiten la puesta en tensión de los tres motorreductores, aumentándose y cerciorándose así los niveles de seguridad.

Las señales digitales del autómatas de seguridad, así como aquellas proporcionadas por los diferentes sensores (finales de carrera, inductivos, etc.), los elementos de actuación por parte del operario (setas, interruptores...) y del robot permiten desarrollar las funcionalidades requeridas para la célula. En base a todo ello y a la lógica programada se generan las señales que gobiernan los diferentes actuadores que permiten el correcto funcionamiento del sistema automatizado completo.

### 4.4.2. Componentes electrónicos

Para la ejecución del gobierno de los actuadores disponibles en la mesa en base a las señales emitidas tanto por el usuario, robot, y sensores la mesa dispone de componentes electrónicos principales que a continuación se describen. También a través del mencionado diseño se desarrolla la seguridad necesaria y exigida en sistemas automáticos en contacto con personas. Los tres elementos principales de control instalados en la célula son: un autómatas de control y gestión de los actuadores, un autómatas de seguridad y dispositivos variadores de frecuencia para el manejo de los motorreductores. El sistema dispone además de otros componentes típicos como son fuentes de alimentación o dispositivos de seguridad, tanto para las personas como para los equipos.

#### 4.4.2.1. Autómatas de control

La funcionalidad de la mesa de posicionamiento en base a las señales emitidas por motores, robot, usuario, sensores y equipos de seguridad es controlada por un autómatas programable de la marca OMRON. Se trata concretamente del modelo SYSMAC CP1L, que es un mini-PLC, caracterizado por sus excelentes prestaciones para aplicaciones sencillas y su tamaño compacto. El modelo instalado pertenece a la serie EM40DRD, que consta de 40 puntos de entradas y salidas y se alimenta a 24VDC. El equipo habilita 24 puntos de entrada y 16 de salida a los que pueden añadirse unidades de expansión adicionales.

Está pensado específicamente para el manejo de relés a partir de una lógica programada mediante el software CX-Programmer, condicionado en las señales de entrada recibidas y el funcionamiento deseado instalado. La programación suele ser implementada en lenguaje tipo escalera y su instalación se realiza desde un ordenador conectado vía USB al autómatas.



Ilustración 30. Fuente de alimentación, autómatas de seguridad y PLC de control

#### 4.4.2.2. Autómata de seguridad

Debido a la interacción entre personas y máquinas con movilidad automatizada en una célula robotizada como la tratada, se precisan unos niveles de seguridad mínimos adecuados en todo momento. Para facilitar la implementación de esta seguridad se dispone del autómata específicamente pensado para estas tareas G9SP-N20S de la marca OMRON. Se alimenta a 24VDC y dispone de 20 entradas de seguridad y 8 salidas.

Este elemento es específicamente empleado para la gestión de todo lo relacionado con la seguridad de la célula y es por ello que controla el estado de los elementos habilitados para tal efecto como pueden ser las setas de emergencia, el detector de presencia o los finales de carrera de seguridad ya explicados. El PLC controla no sólo la activación de cada uno de los componentes de seguridad, sino también su estado, posibilitando así la detección de posibles fallos o averías en ellos, generando la máxima seguridad posible para el operario.

El dispositivo se conecta además con el autómata de control vía RS-232 con CP1W-CIF01 como protocolo de comunicación y es programado vía USB mediante un ordenador desde el software habilitado para tal efecto denominado G9SP Configurator.

Mediante este sistema se desarrollan los programas de seguridad necesarios, teniendo en cuenta todas las señales recibidas de los sensores y diferentes elementos de seguridad para generar una serie de salidas que gobiernan tanto los contactores que posibilitan la funcionalidad de la mesa, como las señales de trabajo pertinentes para robot y autómata de control.

#### 4.4.2.3. Variadores de frecuencia

El empleo de motorreductores para la generación del giro tanto de la mesa completa como de cada estación individual conlleva la necesidad de empleo de convertidores de frecuencia para el control preciso del movimiento desarrollado por los mismos, dado que la aplicación no requiere un giro continuo a velocidad nominal de la máquina.

Para ello se emplean tres variadores trifásicos de frecuencia de la marca VACON, concretamente de la serie 10. Se trata de dispositivos caracterizados por su simplicidad y eficiencia, además de ser extremadamente compactos. Dispone de interfaz con pulsadores y pantalla, ventilador de refrigeración integrado y un controlador PI. Su corriente de salida es de 1A, y su voltaje de salida de 380-480V. Se trata de dispositivos de categoría C2 de protección apta para instalaciones en primer y segundo entorno (aplicaciones domésticas y/o conectadas a una red de suministro de baja tensión).



Ilustración 31. Convertidor de frecuencia

Una de sus principales características es la elevada versatilidad que posibilita para el manejo de los motores, dependiendo de los diferentes parámetros de configuración. De esta manera puede tenerse un control extremadamente elevado del comportamiento deseado del motor controlado, permitiendo editar, por ejemplo, los perfiles de aceleración o deceleración.

#### 4.4.3. Componentes eléctricos

Para complementar y habilitar las funcionalidades dispuestas por los componentes electrónicos ya explicados, el sistema dispone además de un diseño eléctrico concreto que completa el cuadro de mando de la mesa. En él se disponen las seguridades, equipos de alimentación y dispositivos de actuación necesarios que a continuación se describen.



**Ilustración 32. Cuadro eléctrico de la célula**

##### 4.4.3.1. Dispositivos de seguridad

Como elementos de seguridad fundamentales, el cuadro eléctrico asociado a la mesa consta de interruptores magnetotérmicos de diferentes características. Cabe reseñar que existen ya unas protecciones generales (magnetotérmico y diferencial) aguas arriba de la instalación, en la acometida general de la célula, que alimenta tanto al robot, al equipo de soldadura, como a la propia mesa.



**Ilustración 33. Dispositivos de seguridad del cuadro eléctrico**

Se habilita primeramente un interruptor magnetotérmico trifásico modelo iC60N de la marca SCHNEIDER ELECTRIC con un poder de corte de 6000 A. Adicionalmente dispone de dos interruptores monofásicos de la misma marca, modelo iK60N con un poder de corte de 6000 A de corrientes nominales de 4 y 2 A respectivamente.

Se emplea además un interruptor magnetotérmico unipolar para protección de la fase de alimentación del ventilador del cuadro. Este dispositivo es de la marca ETA referencia 2216 – S110 con una corriente de disparo de 0,5 A. Se emplea este dispositivo por su tamaño compacto, simplicidad, y precisión.

#### 4.4.3.2. Fuente de alimentación

En base a los requerimientos de la mayoría de los elementos empleados para el funcionamiento de la mesa, como son los autómatas programables o los sensores, se hace preciso la conversión de los niveles eléctricos provenientes de la red a valores de 24V de corriente continua. Para ello se dispone de una fuente de alimentación de la marca OMRON, modelo S8VK-G12024 capaz de proporcionar 5A, teniendo por tanto una potencia de 120 W.

#### 4.4.3.3. Relés y contactores

Para el manejo de los diferentes equipos gestionados por los dispositivos lógicos programables se disponen relés y contactores como medio de actuación.

Los relés empleados son de la marca SCHNEIDER ELECTRIC, modelo RXL4A06B2BD, alimentados a 24VDC con una capacidad de corriente de 6A. Su potencia media es de 0,9 W. Estos relés se montan sobre una base habilitada y adecuada para ellos.



**Ilustración 34. Relés bipolares**

Los contactores empleados para el arranque de los motores son de la marca SCHNEIDER ELECTRIC, modelo LC1D09, alimentados a 24VDC. Se trata de contactores tripolares con capacidad de potencia de 2,2 kW, por tanto suficientemente válidos para los motores empleados.



**Ilustración 35. Contactores de seguridad para los motores**

#### 4.4.3.4. Termostato y ventilador

Para el control de la temperatura en el interior del cuadro eléctrico tratando de evitar sobrecalentamientos debido al funcionamiento de los variadores de frecuencia, se instala un termostato regulable de la marca STEGO, modelo ZR011 que posibilita la activación del ventilador de la misma marca, modelo FF018.



**Ilustración 36. Termostato para activación del ventilador extractor**

## 4.5. Seguridades

Con motivo de la peligrosidad implicada en el funcionamiento normal de una célula robotizada, debido a las elevadas velocidades alcanzadas por el robot en su movimiento, junto con la peligrosidad inherente en un proceso de soldadura, se disponen de toda una serie de elementos de seguridad para mantener al operario, en primer lugar, y a la instalación y piezas, en siguiente, fuera de todo peligro. Para ello se disponen, además de la seta de emergencia que permite la detención del ciclo automático del robot, otros medios que a continuación se describen.

### 4.5.1. Detector de presencia

Como dispositivo de seguridad principal, la célula de soldadura dispone de una barrera detectora de presencia de la marca Leuze Electronic, concretamente el modelo MLD 300. Se trata de un tranceptor multihaz de luz LED con un alcance comprendido entre 0,5 y 50 metros que permite la detección de presencia de personas entrando en la zona de trabajo de la célula robotizada. Para ello habilita dos haces con una separación de 500mm. El dispositivo se alimenta a una tensión de 24VDC y dispone de dos salidas a transistor PNP, que habilitan en estado alto una tensión de

salida típica de 23VDC. Estas son conectadas al autómatas encargado del control de la seguridad en la misma. Este modelo habilita un tipo de seguridad de nivel 2 según los estándares de seguridad en máquinas.



Ilustración 37. Detector de presencia (izqda.) y su emplazamiento en la célula (dcha.)

La actuación de dicha barrera cancela la orden establecida por el operario de piezas cargadas y listas para soldar. El objeto de este sistema es evitar cualquier tipo de colisión o impacto por movimiento de la mesa cuando el operario se encuentra manipulando los elementos de la misma.

#### 4.5.2. Vallado perimetral

La célula queda confinada dentro de un vallado perimetral de seguridad para evitar el simple acceso a la zona de trabajo del robot en el que se incluyen además indicaciones acústicas y luminosas como balizas de señalización para notificación de trabajo del robot en ciclo automático. El sistema dispone además de una puerta de acceso trasera con sensor de apertura para detención del ciclo automático en dicho caso.



Ilustración 38. Vallado perimetral y puerta de acceso controlada

## 4.6. Control

El gobierno de los diferentes actuadores empleados en la mesa de volteo, con influencia de los sensores habilitados para tal efecto, se ejecuta mediante el autómatas SYSMAC CP1L de OMRON. El diseño establecido posibilita además la comunicación con el robot soldador permitiendo así el desarrollo de un ciclo de trabajo perfectamente organizado.

El principio fundamental del control se basa en el registro del estado de la célula por parte del PLC a través de los diferentes sensores y señales, y la generación de las órdenes pertinentes para los variadores de frecuencia VACON 10 que gobiernan los motorreductores, y también las señales de actuación sobre las electroválvulas para la fijación por medios neumáticos.

Todo ello posibilita el posicionamiento adecuado de los álabes en cada instante, así como el desarrollo completo del ciclo de trabajo pensado para la célula.

### 4.6.1. Programa de control global

Conocido el ciclo de trabajo de la célula (ya descrito en el apartado 4.2) y tras el estudio de la programación cargada en el dispositivo CP1L de OMRON (lenguaje escalera), se ha llevado a cabo su traducción a un diagrama descriptivo equivalente para facilitar su análisis y entendimiento.

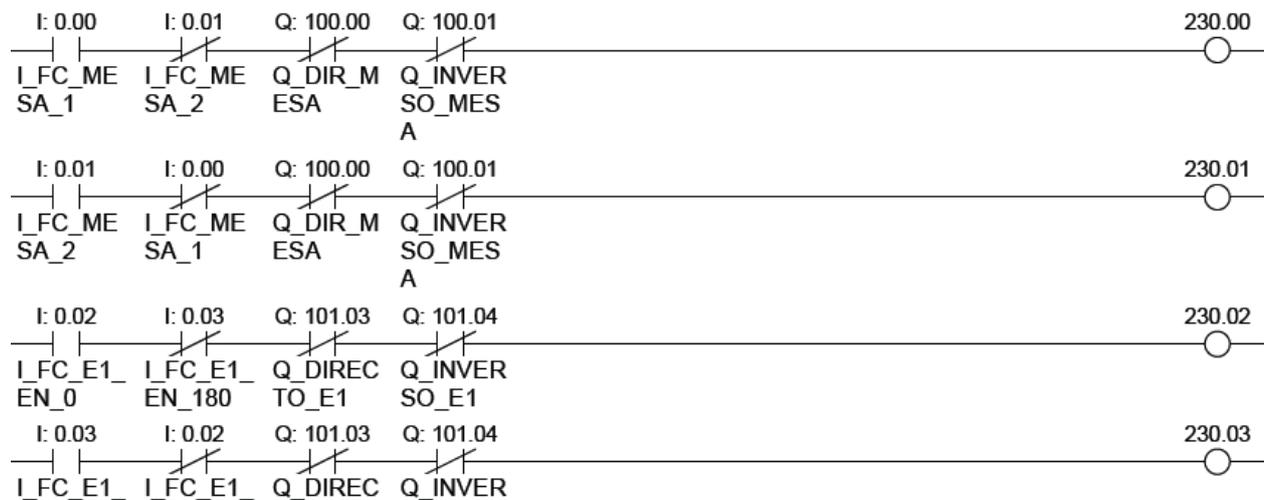


Ilustración 39. Ejemplo de programación en lenguaje LADDER implementada en el PLC

Se recurre para ello al empleo de un diagrama de estados (StateChart) en el que se reflejan las situaciones en las que se puede hallar la célula, los eventos que se generan en cada uno de dichos estados, así como las condiciones de transición para la evolución de uno a otro.

Se describen inicialmente los eventos que son generados, principalmente por el operario que maneja la célula o por elementos de la propia célula (robot, dispositivos de seguridad, etc.). Se definen además las señales internas necesarias para la correcta ejecución del ciclo planteado.

Tabla 3. Eventos y señales

Id.	Descripción	Generado por
eAutomático	Modo de la instalación en ciclo automático	Operario
ePiezasCargadas	Pulsador de confirmación de carga completa de piezas en la estación	Operario
eZonaCarga	Detección de presencia en la zona de carga de piezas	Rejilla electrónica
eFinSoldadura	Fin del ciclo de soldado de álabes	Robot
eFinGiroMesa	Finalización del giro de volteo de la mesa	Mesa
ePosRetAlcanzada	El robot alcanza su posición de retiro	Robot
eFinGiroEstacion	Se completa el giro de la estación porta álabes	Mesa
eFinProceso	Fin del proceso de soldado	Operario
eSetaEmergenciaOFF	Seta de emergencia apagada	Operario
eSetaEmergenciaON	Seta de emergencia activada	Operario
ePuertaCerrada	Puerta de acceso a la célula cerrada	Operario
ePuertaAbierta	Puerta de acceso a la célula abierta	Operario
sRepite	Señal para repetición del proceso de soldadura (para completar soldadura por dos caras)	Interno

Conocidos los eventos se procede a continuación a la descripción de las acciones desarrolladas en cada estado posible de la célula, y que generan la funcionalidad principal de la misma.

Tabla 4. Acciones

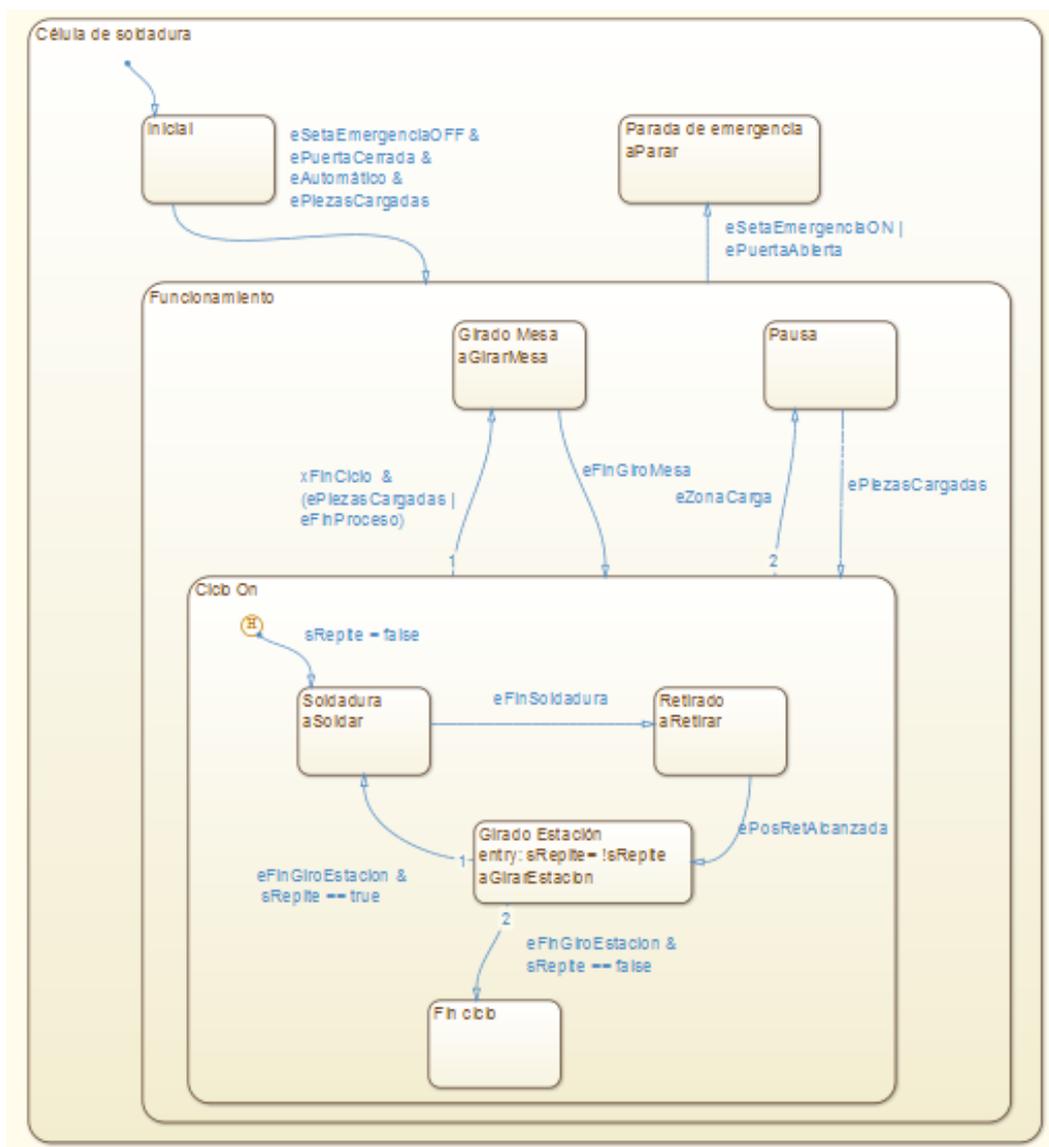
Id.	Descripción	Actúa sobre
aGirarMesa	Motorreductor gira la mesa completa 180°	Motorreductor mesa general de volteo
aSoldar	Arranque del ciclo de soldado	Robot
aRetirar	Retira el brazo del robot a posición de reposo	Robot
aGirarEstación	Motorreductor gira estación en zona de soldadura 180°	Motorreductor estación porta álabes en proceso
aParar	Detención de todos los procesos desarrollados en la célula	Toda la célula

Finalmente se describen a continuación los estados posibles por los que pasa la célula completa durante su ciclo de trabajo.

Tabla 5. Estados

Id.	Descripción
Inicial	Estado inicial de arranque
Girado Mesa	Giro de mesa general
Pausa	Pausa general
Funcionamiento	Superestado de ejecución normal
CicloOn	Superestado de ejecución de ciclo de trabajo
Soldadura	Proceso de soldado de álabes
Retirado	Posición de reposo del robot sin interferir con los componentes
Girado Estación	Proceso de giro de la estación porta álabes siendo soldada
Fin Ciclo	Ciclo de soldado de ambas caras finalizado
Parada emergencia	Estado de parada de emergencia

Con todo ello definido puede procederse al plasmado del ya descrito ciclo de trabajo de la célula a través de un diagrama de estados (que se muestra a escala idónea en el Anexo II), compuesto por todos los elementos anteriormente descritos y mostrado a continuación.



**Ilustración 40. Diagrama de estados de la programación actual de la célula**

La programación actual del sistema está realizada mediante el programa CX-Programmer mediante lenguaje escalera (LADDER), en base a la sencillez del mismo.

Se incluyen en la programación temporizaciones de retardo para evitar la inmediatez de actuación del robot tras finalización del movimiento de la mesa.

#### 4.6.2. Programa del relé de seguridad

El dispositivo de seguridad empleado en la célula es, como ya fue explicado, el módulo G9SP de OMRON, cuya programación ha sido diseñada y adaptada a la célula existente por el suministrador (ELECTRÓNICA EDIMAR).

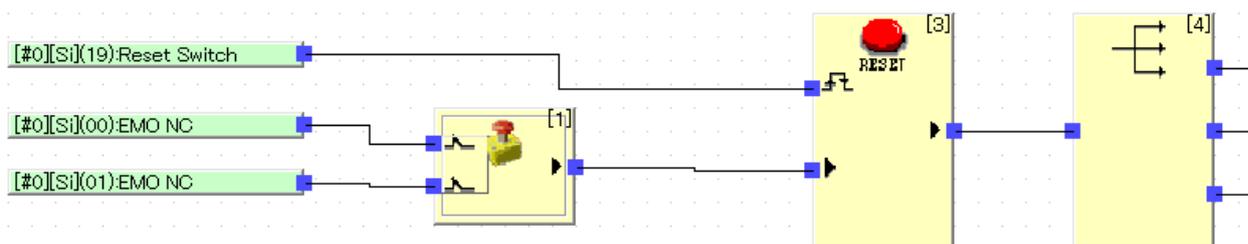
Para posibilitar su modificación y adaptación a la célula mejorada se ha procedido al análisis detallado del programa implementado actualmente, y que es a continuación detallado.

A través del PLC de seguridad se monitorizan las señales de la seta de emergencia principal, de la barrera de presencia y de los finales de carrera de la mesa de volteo general. El dispositivo no sólo registra las señales de dichos elementos cuando son actuados, sino que verifica además el buen estado de cada uno de ellos. En base a ello genera las señales pertinentes para habilitar el funcionamiento adecuado de la célula.

La programación establecida genera un nivel de seguridad tal que inhabilita el movimiento del bastidor en contacto con el usuario mientras, a su vez, mantiene aquel en la zona del robot habilitado para ser movido cuando sea demandado al finalizar el primer proceso de soldadura.

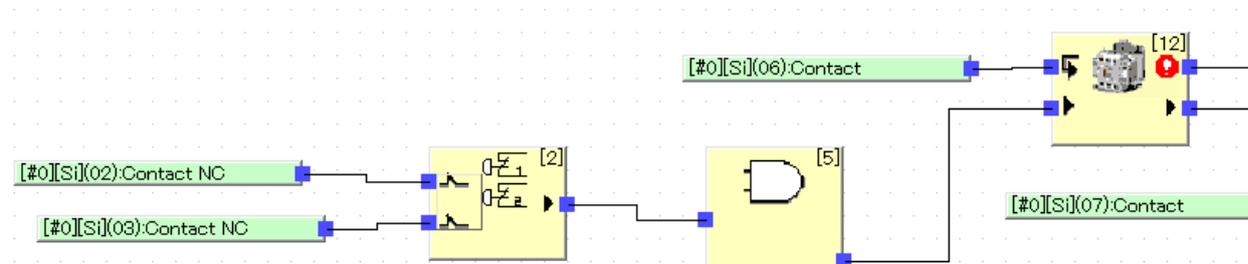
Además asegura la inmovilización de la mesa con una persona detectada por la barrera multihaz. Para ello las salidas del autómatas gobiernan los contactores que permiten la alimentación de los motorreductores de movimiento de la mesa, además de generar una serie de señales enviadas al PLC general y al robot para conocimiento del estado de la célula y actuación consecuyente.

Se dispone una programación basada en bloques funcionales específicos del software de programación G9SP Configurator, en el que el gobierno fundamental viene marcado por la seta de emergencia. A través de la misma y su estado se controlan (mediante puertas lógicas AND) el resto de elementos de una forma tal que si la seta es pulsada, o se detecta en ella algún fallo en sus contactos, el resto de elementos quedan bloqueados, quedando también bloqueada la mesa.



**Ilustración 41. Evaluación del estado de la seta de seguridad y multiplexado**

El siguiente nivel lo asume la barrera de presencia, cuya señal de detección y/o su estado permite igualmente el bloqueo de todos los actuadores de la mesa a través de los contactores dispuestos para ello. Adicionalmente se realiza la monitorización del estado adecuado de los relés contactores para asegurar su buen funcionamiento, y detener la célula en caso contrario.



**Ilustración 42. Sección de evaluación de la barrera de seguridad**

Finalmente se dispone de un tercer nivel de seguridad que involucra a los finales de carrera del volteo de la mesa. Se programan de manera que se consigue el funcionamiento planteado: se habilita el giro de la estación en el lado del robot, y se impide el de la que está en la zona de carga, y por tanto en contacto con el operario.

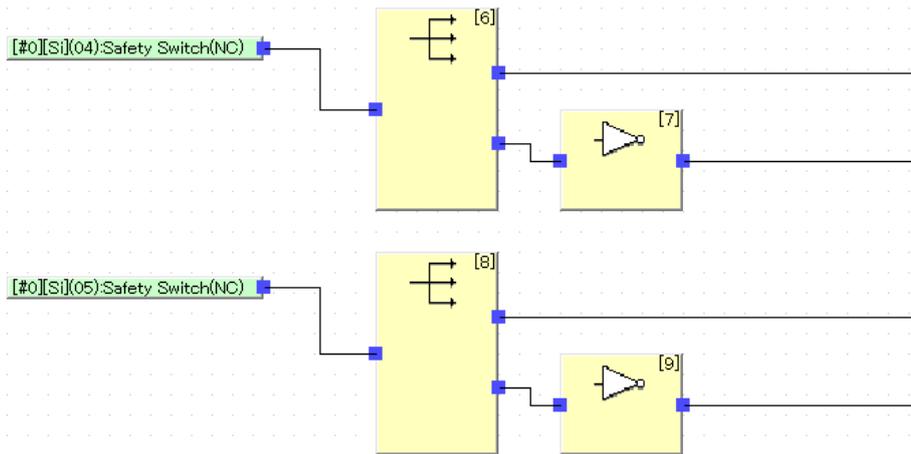


Ilustración 43. Control de seguridad de estaciones

## 4.7. Robot soldador

El robot empleado para la ejecución del cordón de soldadura es el KR16 L6-2 de la marca Kuka con un alcance de 1911mm de radio. Dispone de una capacidad de carga de 6 kg con una carga adicional de 10 kg. Las velocidades desarrolladas en los ejes van desde 156°/s para los ejes más lentos hasta 647°/s para el más rápido. Ofrece además una repetibilidad de  $\pm 0,05$  mm.

El robot pesa en su totalidad en torno a los 240 kg y dispone de un volumen de trabajo útil de 24 m<sup>3</sup>.

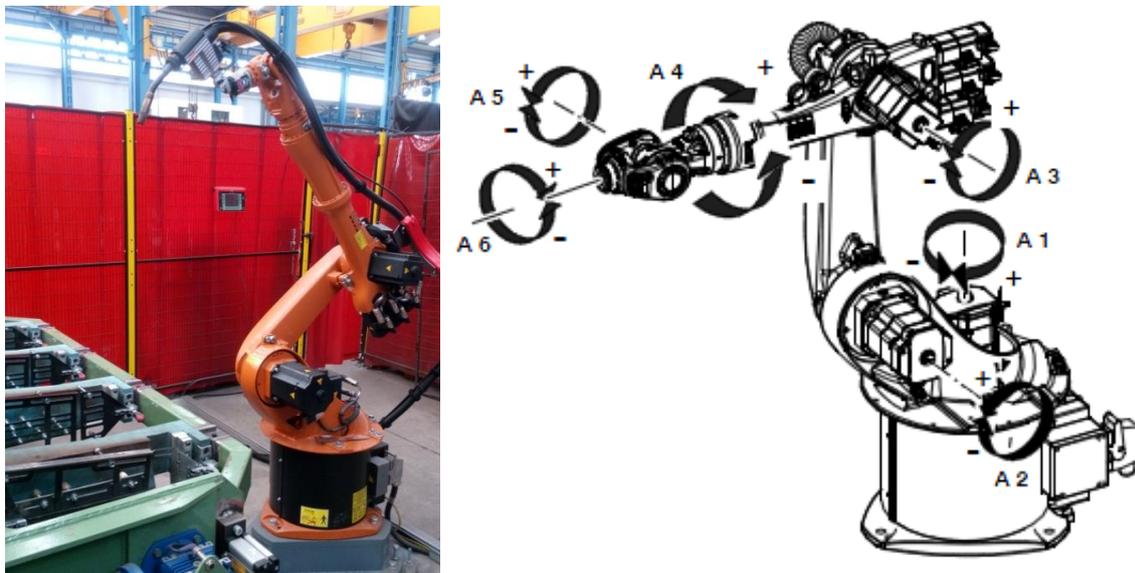


Ilustración 44. Robot KR16 L6-2 y sus grados de libertad

Los accionamientos del robot se basan en servomotores de corriente alterna controlados electromecánicamente. La potencia total de motores instalada asciende a 8,8 kW.

## Programación

La programación del robot se realiza mediante el módulo software ARCTECH específico de KUKA. Mediante la consola dispuesta en el robot, generalmente a través de una programación punto a punto, el operario puede modificar los parámetros de funcionamiento o trayectorias de acuerdo a las necesidades del proceso.

El método de descripción de trayectorias consiste en el posicionamiento manual del robot en los puntos principales que describen el cordón de soldadura, tras lo cual se genera la memorización de dichos puntos para que, posteriormente, el propio software habilite la descripción de las trayectorias de forma óptima, en función del comando introducido, posibilitándose así movimientos directos punto a punto, mediante descripción de curvas, u otros movimientos aproximados.

Debido a la criticidad del manejo del robot, ha resultado complejo el acceso a la programación específica del mismo, por lo que no se ha llevado a cabo una profundización en este apartado.

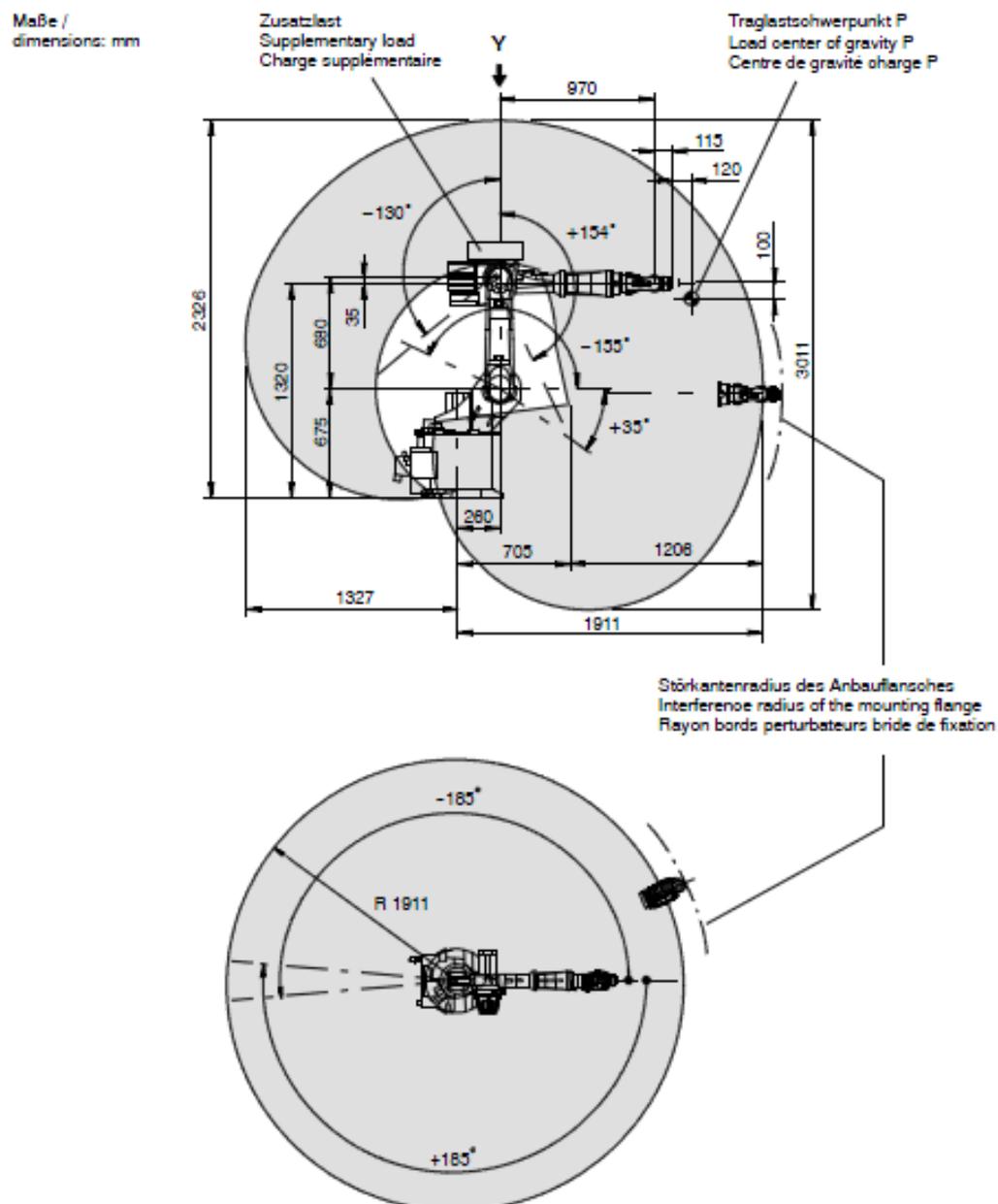
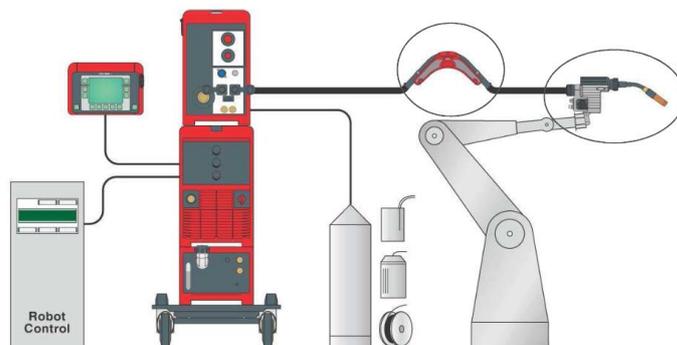


Ilustración 45. Espacio de trabajo del robot KR16 L6 [Kuka Robots]

## 4.8. Útil de soldadura

Para la implementación del proceso de soldadura se dispone de un equipamiento completo de soldadura de la marca FRONIUS compuesto por una unidad de potencia, que dispone de alimentador del electrodo, una antorcha acoplable al robot y una unidad de limpieza de todo el sistema.



**Ilustración 46. Equipamiento para instalaciones automatizadas [Fronius]**

El equipo soldador se basa en la tecnología CMT (Cold Metal Transfer) de soldadura en el cual la transferencia de material de aporte se produce con un aporte térmico menor a los sistemas convencionales.

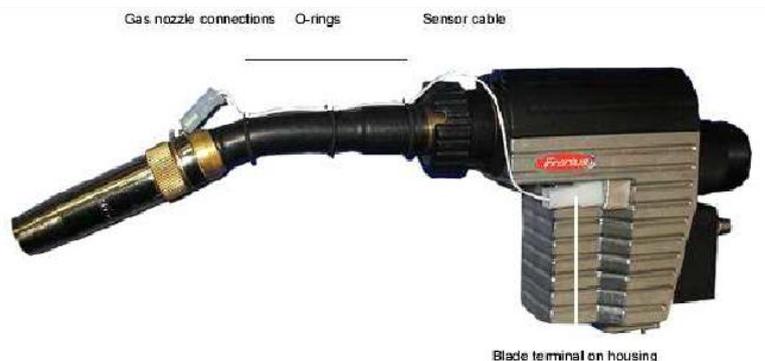
La fuente de potencia TransSynergic de la marca Fronius se basa en una fuente de corriente que dispone de un microcontrolador digital para el control de la inversión de corriente. Durante el proceso de soldadura, el microcontrolador recibe de manera continua los datos reales del proceso, reaccionando inmediatamente para, mediante el ajuste programado, conseguir la soldadura óptima.

La fuente consta además de un sistema de aporte de material mediante rodillos controlados digitalmente que permite velocidades máximas de hilo de hasta 22m/min. La tensión de soldadura varía en un rango comprendido entre los 10 y los 40 V.



**Ilustración 47. Unidad de potencia y alimentador de electrodo [Fronius]**

La antorcha empleada en el robot es el modelo Robacta Drive CMT que es refrigerada por el propio gas protector. Para el fácil suministro del cable desde la zona de la unidad de potencia hasta la propia antorcha, el sistema dispone de un búfer intermedio que posibilita la coordinación del movimiento entre los motores de alimentación y la adaptación a la distancia desde la unidad de alimentación al punto de aplicación.



**Ilustración 48. Antorcha de soldadura [Fronius]**

Para la ejecución de la limpieza de la antorcha de soldado se dispone igualmente de un dispositivo de la casa FRONIUS.

Adicionalmente se proporciona un mando a distancia tipo RCU-5000 de la casa Fronius para facilitar el manejo de la fuente de corriente empleada. Dispone de una pantalla LCD en el que se puede manejar de forma sencilla el programa de control de los parámetros de soldadura. El dispositivo va alimentado a 24V DC y tiene un peso de 1,5 kg. El mando resulta idóneo para una aplicación robotizada y automatizada como la concerniente.

## 4.9. Interacción mesa - robot

Para el correcto funcionamiento global de la célula, existe un conexionado entre robot y mesa que trabaja con señales digitales libres de potencial para establecimiento de la comunicación. Con ello se consigue la ejecución del ciclo del proceso de la forma óptima con la interacción precisada entre los diferentes componentes de la célula. A continuación se detallan las principales señales de interacción entre mesa y robot, planteadas por la empresa Hurtado Rivas.

**Tabla 6. Señales de interacción mesa - robot**

<b>MOTOR 1</b>					
E/S	Descripción	Id.	Valor	Interpretación	
E	Orden de volteo	OVM	0	Robot desea mesa parada	
			1	Robot quiere voltear mesa completa	
S	Estación 1	ME1_P	0	Volteo de la estación 1 no completado/motor en movimiento	
			1	Volteo de la estación 1 en posición de trabajo del robot y motor parado	
	Estación 2	ME2_P	0	Volteo de la estación 2 no completado/motor en movimiento	
			1	Volteo de la estación 2 en posición de trabajo del robot y motor parado	

**MOTOR 2**

E/S	Descripción	Id.	Valores	Interpretación
E	Orden de volteo	OVE1	0	Robot desea estación parada
			1	Robot indica necesidad de volteo de la estación 1
S	Retorno de estado	E1_P1	0	Volteo de la estación 1 no completado/motor en movimiento
			1	Estación 1 en posición de trabajo del robot y motor parado
	Retorno de estado	E1_P2	0	Volteo de la estación 2 no completado/motor en movimiento
			1	Estación 2 en posición de trabajo del robot y motor parado

**MOTOR 3**

E/S	Descripción	Id.	Valores	Interpretación
E	Orden de volteo	OVE2	0	Robot desea estación parada
			1	Robot indica necesidad de volteo de la estación 2
S	Retorno de estado	E2_P1	0	Volteo de la estación 1 no completado/motor en movimiento
			1	Estación 1 en posición de trabajo del robot y motor parado
	Retorno de estado	E2_P2	0	Volteo de la estación 2 no completado/motor en movimiento
			1	Estación 2 en posición de trabajo del robot y motor parado

Además el pineado del conector en el cuadro de control de la mesa de giro queda configurado como:

**Tabla 7. Pineado del conector mesa - robot**

PIN	Descripción de señal	Id.
1	Estación 1 en posición robot	ME1_P
2	Estación 2 en posición robot	ME2_P
3	Mesa de volteo, estación 1, posición 0°	E1_P1
4	Mesa de volteo, estación 1, posición 180°	E1_P2
5	Mesa de volteo, estación 2, posición 0°	E2_P1
6	Mesa de volteo, estación 2, posición 180°	E2_P2
7	Común entre entradas robot-salidas control mesa	
8	Orden de giro de mesa completa	OVM
9	Orde de volteo de estación 1	OVE1
10	Orden de volteo de estación 2	OVE2
11	Común salidas robot - entradas control mesa	
12	Canal A reja electrónica carga/descarga	
13	Canal A' reja electrónica carga/descarga	
14	Canal B reja electrónica carga/descarga	
15	Canal B' reja electrónica carga/descarga	
16	Reserva	

## 5. ANÁLISIS

Una vez recopilada la información completa de la célula de soldadura de álabes se procede al análisis de la misma para detectar puntos débiles, aspectos potencialmente mejorables y plantear soluciones capaces de aumentar la eficiencia y productividad del sistema.

### 5.1. Puntos débiles

Una vez estudiada en profundidad la célula de soldadura, y tras la evaluación de la opinión de las personas con contacto con la misma, se han detectado una serie de deficiencias que podrían ser objeto de mejora. A continuación se enumeran las principales:

- Soldadura de interrumpida de cada álabe
- Acumulación de error y desvío en trayectorias de soldadura
- Programación tediosa de trayectorias
- Uso de motorreductores para el giro
- Diseño inestable de la estructura de la mesa posicionadora
- Necesidad de corrección continua de perfil de soldadura
- Falta de robustez del sistema sensor de posición
- Asimetría en posición estable
- Lentitud en la carga y descarga de álabes
- Problemas en la lógica de control
- Alumbrado deficiente

Como había sido introducido, el punto crítico de la célula es la mesa posicionadora. Primeramente en lo referido al proceso productivo, de manera que debido al diseño propio de la mesa, no se permite la ejecución de la soldadura completa de cada álabe de manera continuada. Como ya fue introducido, para completar el proceso de fabricación de cada álabe, se precisa la ejecución de dos cordones de soldadura, uno por cada perfil. Para evitar deformaciones por efecto térmico, se demanda la ejecución de la soldadura de ambos perfiles, para conseguir así un equilibrio de tensiones opuestas, minimizando dicha deformación. Sucede que con el actual ciclo de trabajo permitido por la mesa diseñada, se ejecutan primeramente los cordones de soldadura del perfil superior de los cuatro álabes dispuestos en cada estación, para pasar posteriormente a la soldadura de los otros cuatro perfiles restantes. Se genera por tanto una demora entre la soldadura del primer cordón y el segundo de un mismo álabe que se corresponde con el tiempo empleado en el desarrollo de la soldadura en los 3 álabes restantes en la estación.

Adicionalmente, la necesidad de desarrollo de cuatro trayectorias de soldadura de manera sucesiva facilita la acumulación de errores o imprecisiones en las mismas, pudiendo generarse desvíos importantes pese al correcto posicionado de los álabes.

Originado por el mismo motivo de la multiplicidad de trayectorias a programar, aparece también el elevado número de puntos a programar para la definición de las mismas. Para el desarrollo de una buena trayectoria, se precisan 12 puntos programados manualmente, resultando por tanto en un mínimo de 48 puntos en el mejor de los casos (que, como será explicado posteriormente, nunca se dará debido a las asimetrías e imprecisiones de la mesa, resultando por tanto en un

número mucho más elevado de puntos requeridos). Ello supone un proceso largo y tedioso que consume tiempo y esfuerzo cada vez que el programa de soldadura debe modificarse, bien por motivos de reajuste, o bien por motivos de variación de la serie productiva. Esto supone un claro hándicap a la versatilidad buscada para la célula.

Por otro lado, debido a la configuración actual de la mesa (tanto en su parte mecánica, sensórica, como de control) se generan toda una serie de imprecisiones que restan eficiencia al proceso automatizado, disminuyéndose por tanto la búsqueda productividad que se le presupone a un sistema tal.

El principal problema detectado reside en la escasa repetibilidad en el posicionado de los álabes para su soldadura. A ello contribuyen por un lado el diseño mecánico de la propia mesa, en que las posiciones de soldadura permanecen en voladizo (aunque posteriormente fijadas por cilindros neumáticos), con la inestabilidad que ello conlleva. El uso de motorreductores se presenta como inadecuado para los niveles de precisión exigidos, al menos con la configuración dispuesta actualmente para la mesa.

Por otro lado, el proceso de fabricación y montaje del equipo ha generado una asimetría en la posición de trabajo de las estaciones por desviación del casquillo de inserción del cilindro neumático de indexado. Esto genera una diferencia de colocación final entre ambas estaciones.

Otro de los puntos débiles de la célula aparece en el sistema de utillajes porta-álabes. El mecanismo de bloqueo mediante palanca tiene una holgura considerable, lo que genera una indeterminación en su posición final. Además se considera el giro del utillaje desaprovechado, dado que únicamente se emplea para pasar a una posición de carga y descarga, precisando además una actuación manual por parte del operario que supone esfuerzo y tiempo.

Todas estas deficiencias contribuyen a la mencionada escasa repetibilidad en el posicionado de los álabes, de manera que se precisa un reajuste manual de la programación de las trayectorias descritas por el robot para cada ciclo de trabajo. Además no existe seguridad en la descripción de la trayectoria de soldadura, de manera que el operario debe permanecer en alerta para detectar posibles desvíos, incapacitándole para el desarrollo de tareas paralelas. Se pierde pues la filosofía de automatización del trabajo mediante el robot.

Otro de los problemas detectados es la escasa robustez del sistema actual de registro de la posición de la mesa de volteo general mediante pletinas y finales de carrera, resultando descentrado ante el mínimo contacto, lo cual genera errores importantes de posicionado, precisándose el recalibrado y la reprogramación cuando esto sucede.

Existe también una problemática asociada a la lógica de control de la célula, en base a la cual el modo de funcionamiento no es completamente automático. En el arranque, se precisa de un rearme manual y reseteo por parte del operario para habilitar el funcionamiento de los cilindros neumáticos. Tras ello, los movimientos de la mesa deben ser ejecutados durante el primer ciclo de forma manual desde la consola del robot, tras lo cual el sistema habilita el funcionamiento en modo automático. Esto supone un proceso tedioso de trabajo manual completamente evitable con la correcta configuración.

Se considera por tanto que las mejoras fundamentales de la célula pasan por la consecución de un posicionado preciso y estable a través de la mesa de posicionado, así como el aumento de la robustez de la misma para el desarrollo de un trabajo fiable y eficiente.

## 5.2. Requerimientos, especificaciones y deseos

Para posibilitar la labor de corrección de los puntos débiles planteados y plantear otras mejoras potenciales, se hace necesario conocer los requisitos y especificaciones mínimas principales que permitan el diseño de la célula óptima automatizada. Se trata pues de buscar una solución ingenieril que permita exprimir al máximo las capacidades de los sistemas disponibles, generando la máxima calidad de producto final, aumentando la eficiencia y productividad, y simplificando el trabajo a realizar por parte del operario.

Teniendo en cuenta el fin último de la célula, el primer requerimiento tiene que ver con la posibilidad de soldadura de, al menos, dos de los perfiles del álabe, con la posibilidad de una inclinación mínima de  $60^\circ$  de la antorcha de soldadura con respecto al perfil descrito. La posición óptima de soldadura consta de unos  $15^\circ$  de inclinación con respecto a la horizontal, de manera que la trayectoria pueda ser realizada de manera descendente desde el punto más elevado. Con ello se consiguen velocidades elevadas de deposición que influye en la energía bruta aportada (EBA), limitada por el fabricante del material específico considerado.

Otro de los requerimientos fundamentales que se exigen, como ya fue brevemente introducido en el apartado 5.1, es la conservación del calaje del álabe (ángulo de torsión desde la base a la punta) durante su soldadura. El problema principal reside en que el efecto de la temperatura generada durante el proceso tiende a enderezar las piezas, lo cual termina en una pérdida de prestaciones cuando es montado sobre su rodete. Se hace pues preciso un sistema capaz de mantener las piezas a soldar perfectamente fijas, evitando su deformación.

La situación idónea de soldadura se produciría con el desarrollo de los dos cordones del álabe de forma simultánea, sin embargo ello supondría la necesidad de dos robots de soldadura, con las consecuencias económicas inasumibles que ello presenta. El siguiente escalón de optimización es por tanto la soldadura de los dos cordones del mismo álabe de forma consecutiva, es decir, evitando la demora entre la finalización del primer cordón y el comienzo del segundo. El motivo reside en que el enfriamiento tras la soldadura de una trayectoria genera una deformación que produce en ocasiones la distorsión del otro perfil a soldar, separando las dos chapas o incluso rompiendo los puntos iniciales dados. El método actual precisa un tiempo entre soldaduras marcado por el desarrollo de cuatro trayectorias, antes de proceder al siguiente cordón, lo cual genera el comentado enfriamiento. Con la soldadura en serie de ambas trayectorias se evita dicha espera y por tanto el enfriamiento inherente, evitándose los problemas de deformación.

Una situación óptima consistiría en el empleo de una única trayectoria de soldadura, disminuyéndose así los errores acumulados y desvíos inherentes en el desarrollo de múltiples trayectorias. Se posibilita además una mayor facilidad en la programación al precisar únicamente la memorización de una serie de puntos que definan el cordón a soldar.

La producción planteada actualmente para la célula robotizada es de 8 álabes soldados cada 30 minutos, lo que supone aproximadamente un total de 120 unidades diarias completadas.

Otro de los aspectos fundamentales que debe ser inherente en la célula es el nivel de seguridad adecuado de acuerdo con la Directiva de Máquinas 2006/42/CE, de 29 de Diciembre de 2009. Se deberán tener por tanto en consideración todas las disposiciones enumeradas en el Anexo I de la citada normativa.

Se plantea a continuación un listado resumen de las principales exigencias planteadas para el diseño de la célula de soldadura, que servirán para facilitar la evaluación de las diferentes alternativas que sean planteadas como soluciones.

Tabla 8. Lista de exigencias y deseos para la mejora de la célula

Nº	Exigencia/Deseo	Descripción de la exigencia
<b>01 - FUNCIONALES</b>		
01.01	D	Posibilidad de soldadura del álabe completo
01.02	D	Soldadura continua de un mismo álabe
01.03	D	Mínimo número de trayectorias de robot
01.04	E	Facilidad de carga y descarga
01.05	E	Seguridad del operario
01.06	D	Capacidad de trabajo simultáneo robot-operario
01.07	E	Capacidad mínima de 8 álabes
01.08	E	Soldadura de álabes de entre 300-700 mm
01.09	E	Utilización de robot Kuka KR16-L6
01.10	E	Funcionamiento automatizado
01.11	D	Posibilidad de soldadura de punta de álabe
01.12	E	Funcionamiento manual del sistema
01.13	D	Versatilidad y adaptabilidad de la mesa
01.14	E	Precisión de posicionado acorde con el robot
01.15	E	Resistencia a condiciones de trabajo
01.16	E	Resistencia frente deformación por enfriamiento del álabe
<b>02 – GEOMÉTRICAS</b>		
02.01	E	Área máxima ocupada 15 m <sup>2</sup>
02.02	E	Altura del álabe a soldar entre 800-1000 mm
02.03	D	Volumen mínimo ocupado
<b>03 – DINÁMICAS</b>		
03.01	E	Movimiento seguro
03.02	D	Máxima rapidez en posicionado
03.03	E	Minimización de GDL para mayor control
03.04	E	Estabilidad máxima en posición de soldadura
<b>04 – ENÉRGICAS</b>		
04.01	E	Alimentación eléctrica y neumática
04.02	D	Consumo eficiente
<b>05 – MATERIALES Y COMPONENTES</b>		
05.01	E	Materiales de fácil disponibilidad
05.02	E	Componentes sustituibles
05.03	D	Aprovechamiento/reciclado máximo de mesa existente
05.04	D	Economización máxima
<b>06 – FABRICACIÓN</b>		
06.01	D	Piezas estandarizadas
06.02	D	Piezas de geometría sencilla
06.03	D	Piezas intercambiables
06.04	D	Fabricación rápida
06.05	D	Fabricación posible en Talleres Zitrón
<b>07 - CONTROL</b>		
07.01	E	Funcionamiento autónomo
07.02	E	Funcionamiento manual

Nº	Exigencia/Deseo	Descripción de la exigencia
<b>07.03</b>	E	Sistemas de seguridad según Directiva de Máquinas 2006/42/CE
<b>07.04</b>	E	Simplicidad de software de control
<b>07.05</b>	E	Control mediante autómatas programables
<b>07.06</b>	D	Aprovechamiento de componentes existentes
<b>07.07</b>	E	Sencillez de manejo por parte del operario
<b>07.08</b>	E	Interfaz intuitiva y accesible por el usuario
<b>07.09</b>	E	Comunicación apropiada entre robot y mesa
<b>07.10</b>	E	Niveles de tensión de señales seguros
<b>08 – ACTUADORES</b>		
<b>08.01</b>	E	Empleo de actuadores eléctricos y/o neumáticos
<b>08.02</b>	E	Actuadores robustos y económicos
<b>08.03</b>	D	Aprovechamiento de los componentes existentes
<b>08.04</b>	D	Automatización de la mayoría de acciones
<b>08.05</b>	E	Seguridad máxima en funcionamiento
<b>08.06</b>	D	Máxima velocidad de proceso
<b>08.07</b>	D	Partes móviles protegidas
<b>09 - SENSORICA</b>		
<b>09.01</b>	E	Sensores robustos y económicos
<b>09.02</b>	D	Minimización de sensorización
<b>09.03</b>	E	Consecución de la precisión mínima requerida
<b>09.04</b>	E	Empleo de sensores disponibles en existencia
<b>09.05</b>	E	Niveles seguros de señales
<b>09.06</b>	E	Protección de los sistemas de sensorización
<b>10 - OTROS</b>		
<b>11.01</b>	E	Diseño ergonómico
<b>11.02</b>	E	Disposición de sistemas de seguridad y protección según normativa vigente: Directiva de Máquinas 2006/42/CE

La lista dispuesta será empleada en el planteamiento de las diferentes alternativas para la mejora de la célula tratada, y de ella se extraerán también los criterios de valoración de cada una de dichas alternativas para la selección de la solución óptima.

## **6. MEJORA DE LA CÉLULA: ALTERNATIVAS**

Se procede a continuación al planteamiento de potenciales mejoras susceptibles de ser implementadas para aumentar tanto la eficiencia del proceso como su productividad, en lo que constituye la segunda principal tarea del presente proyecto.

Se trata por tanto de plantear soluciones que permitan el desarrollo de la funcionalidad de la célula de acuerdo a las necesidades, requerimientos y deseos especificados a lo largo de todo el proyecto, y más concretamente en el capítulo 5. Se busca por tanto la posibilidad de ejecución de una soldadura en las condiciones idóneas, habilitando además la posibilidad de aumentar la capacidad del proceso para lograr la máxima productividad posible.

Para ello se plantean una serie de soluciones y modificaciones que afectan a todos los niveles mecánicos de la célula robotizada y que, tras ser descritos, serán posteriormente evaluados para posibilitar la elección de la solución óptima que será objeto de desarrollo detallado en el presente trabajo.

Surgen por tanto dos vías principales de mejora: una en la que se contempla el aprovechamiento máximo de la célula existente mejorando su capacidad y calidad del proceso a través de pequeñas mejoras susceptibles de ser ejecutadas de forma sencilla; y otra en la que se plantea, en base al conocimiento adquirido de la célula actual, un rediseño íntegro que permita dar solución a todos los requisitos y deseos de forma óptima.

Se procede a continuación a la descripción de las diversas alternativas ideadas.

### **6.1. Adaptación de la mesa existente**

Se plantea una primera vía de mejora de la célula robotizada, basada en el aprovechamiento máximo de la existente, sin modificar su filosofía de diseño original. Se pretende con ello plantear una serie de mejoras aplicables prácticamente con carácter inmediato, y posibilitando el funcionamiento mejorado de la célula en un corto plazo.

#### **6.1.1. Mejoras mínimas sencillas**

La primera solución planteada consiste en solventar los problemas más evidentes detectados en la célula actual, focalizados principalmente en la mesa posicionadora y descritos en el apartado 5.1.

Así pues, la disposición de una carcasa protectora cubriendo las pletinas de contacto para evitar la alteración del sistema de detección de la posición por las personas trabajando en la célula elimina la problemática del descalibrado del sistema de posicionamiento de la mesa general.

Otro punto principal consiste en la corrección de la asimetría existente entre estaciones permitiendo utilizar un único programa de soldadura para ambas. Para solucionar este problema se debe llevar a cabo la medición de del desnivel existente, y ser solucionado mediante la reubicación de los casquillos de indexado en la posición adecuada. La implementación es sencilla y rápida, y evita una gran pérdida de tiempo en la reprogramación para cada estación.

Igualmente puede procederse al ajuste fino del sistema de bloqueo de los utillajes para tratar de eliminar la holgura existente, permitiendo así una mayor precisión en el posicionado de álabes. Ello se conseguiría reemplazando los ejes de bloqueo existentes por unos mecanizados con un ajuste fino con respecto al casquillo del utillaje.

La instalación de una buena iluminación en la zona de definición de las trayectorias del robot, o la corrección el programa de control instalado en el PLC son otras medidas sencillas con gran repercusión en la comodidad en el trabajo por parte del operario.

### **6.1.2. Uso de motores paso a paso**

Otra opción susceptible de ser considerada consiste en el reemplazo de los motorreductores instalados por los más comúnmente empleados motores paso a paso o incluso servomotores, que permitan un control preciso del movimiento. Éstos ofrecen una mayor versatilidad de posicionado de manera que podría implementarse un posicionamiento perfectamente controlado para que el proceso de soldadura se desarrolle en las condiciones óptimas, por ejemplo en lo referente a la inclinación de la antorcha con respecto a las partes a soldar.

Con la instalación de este tipo de actuadores se eliminaría la necesidad de sensores final de carrera dispuestos tanto en la mesa general de volteo como en las estaciones. Además, debido a que la filosofía de la mesa está fundamentada en el empleo de motorreductores, se precisarían una serie de modificaciones adicionales en el diseño mecánico de la mesa, como la eliminación de los sistemas neumáticos de indexado.

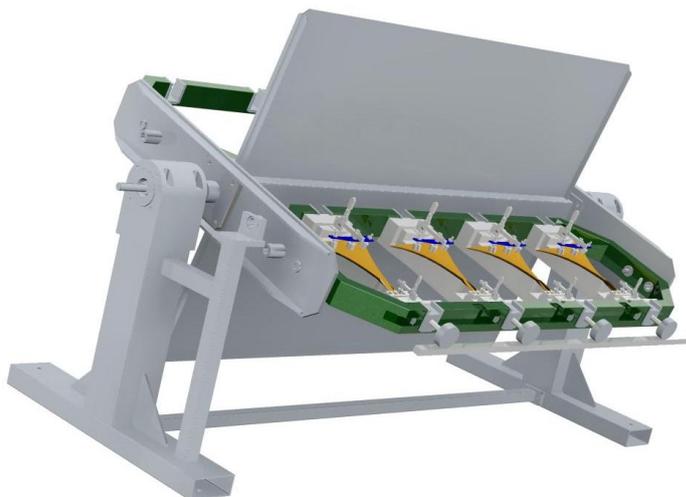
### **6.1.3. Dotación de giro al utillaje**

La solución planteada a continuación conlleva un mayor grado de modificación de la mesa existente, pero mantiene la filosofía propia de la misma. La alternativa surge como consecuencia de la búsqueda de la optimización del proceso de soldadura de acuerdo a los criterios especificados en el apartado 5.2 , principalmente el referido al desarrollo los dos perfiles de soldadura de forma consecutiva sobre el mismo álabe.

La forma de trabajo mencionada resulta difícil de ejecutar con la configuración de la mesa actualmente existente debido a la necesidad de volteo de la estación tras la finalización de cada cordón, con lo que se precisarían 4 giros totales para completar los álabes cargados.

La ejecución de dicho volteo repetidamente (más aún si se consideran las largas tiradas de producción previstas) resultaría completamente ineficiente y resultaría finalmente en desgaste prematuro de los componentes, dado que el diseño no está previsto para dicha funcionalidad.

Se plantea una alternativa de diseño en que se traslada la función de volteo de los álabes a los propios utillajes portadores, en lugar de a la estación completa. El sistema puede implementarse mediante la transmisión del movimiento generado por un actuador a cada uno de los utillajes, por ejemplo mediante un sistema piñón cremallera, o uno sistema de palancas. Se precisaría por tanto la incorporación de un actuador adicional junto con un medio de transmisión apropiado. Además se requeriría la modificación del eje de soporte del utillaje, para conferirle un acoplamiento adecuado al sistema instalado.



**Ilustración 49. Dotación de giro a los utillajes**

Se elimina por tanto la necesidad de giro del bastidor porta álabes con lo que se podría ejecutar la fijación absoluta del mismo dotando al conjunto de mayor robustez. Se elimina también la necesidad de dicho actuador y su cilindro de fijación asociado, siendo necesario uno único para la generación del giro mencionado. El bastidor global de la mesa, así como el sistema de volteo general (para disposición en la zona de carga y descarga o en la del robot) se mantendría igual al originalmente planteado.

Con esta solución se posibilita la soldadura completa de cada álabe, ejecutándose primeramente uno de los perfiles, girando el utillaje, para finalizar con la soldadura del opuesto. Se consigue además paliar otro de los problemas detectados referido a la robustez y estabilidad del sistema global.

La desventaja que persiste en esta alternativa reside en la necesidad de programación de cuatro trayectorias para la soldadura, así como el mantenimiento de cómo mínimo cuatro actuadores totales para la mes, con la complejidad de control que ello conlleva.

## **6.2. Rediseño completo**

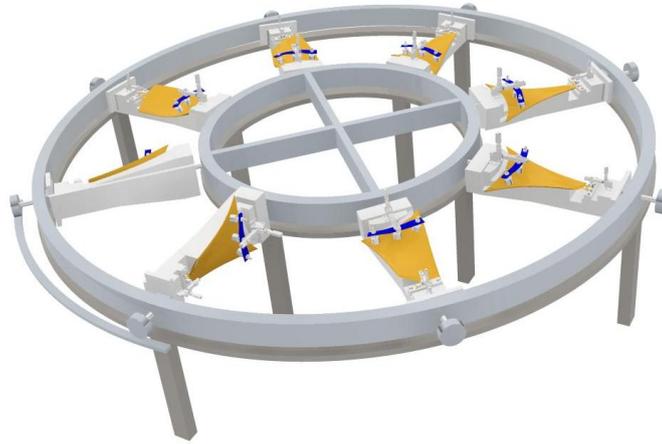
La segunda vía planteada para la consecución de la optimización de la célula consiste en el rediseño completo de la mesa posicionadora. Partiendo de los requisitos establecidos, y de la experiencia registrada, sobre todo en lo referente a los puntos débiles de la mesa actualmente empleada, se procede a la evaluación de alternativas que suponen un diseño completamente diferente al ya planteado. Sucede con ello que la implementación puede resultar más costosa, requiriendo incluso un período mayor de fabricación y montaje.

Sin embargo el rediseño íntegro depurado posibilita, a medio plazo, la consecución de un proceso idóneo de trabajo, no sólo incrementando la calidad del producto final, sino también la productividad, eficiencia y comodidad del operario.

A continuación se describen las múltiples variantes ideadas para acometer la mencionada mejora. Cabe destacar que algunas de las alternativas se plantean para un utillaje de álabe modificado, cuyo diseño será planteado y evaluado en el capítulo 8.

### 6.2.1. Mesa circular plana

Como primera opción se plantea una mesa circular rotatoria, sobre la que se instalan utillajes como los empleados actualmente. Se disponen dos bastidores, con movimiento relativo entre ellos (como si de un rodamiento axial se tratase), posibilitándose así el giro respecto a un hipotético eje perpendicular al plano del suelo.



**Ilustración 50. Mesa circular plana con volteo por sistema mecánico**

La primera ventaja que ofrece es la posibilidad de desarrollo de la soldadura de forma idónea, a través de la deposición de los dos cordones necesarios de forma consecutiva. Además se considera un único emplazamiento de soldadura al que los álabes llegan con el giro del bastidor, por lo que el número de trayectorias a programar se reduce a una.

Para la consecución del giro del álabes que posibilite la soldadura de los dos perfiles opuestos, se plantean dos alternativas diferentes:

Por un lado, con un diseño adecuado del dispositivo de fijación del utillaje puede habilitarse un sistema basado en seguidor-guía o piñón cremallera que genere el posicionado precisado aprovechando el propio giro del bastidor. Además se emplea la guía para llevar el utillaje a la posición horizontal que facilita la carga y descarga por parte del operario.

La otra solución pasa por incorporar un actuador adicional que genere dicho volteo, en lo que supone una solución más sencilla y fácilmente controlable.



**Ilustración 51. Mesa circular plana con volteo mediante actuador auxiliar**

En ambos casos, otra ventaja de la configuración global planteada viene por el mayor grado de estabilidad de los utillajes en el plano, que facilitaría la tarea de soldadura. Además la necesidad de un único motor que proporcione el giro supone otra gran ventaja, tanto a nivel de costes como de control.

El actuador empleado podría ser un motorreductor sencillo dado que la holgura e imprecisión inherentes, aunque ello generase la necesidad de fijación de la mesa una vez alcanzada la posición de soldadura con algún método de frenado (como los cilindros propuestos en la mesa actual).

Sin embargo dicha holgura se presenta sobre el giro de la mesa, grado de libertad sobre el que no existe ningún esfuerzo que pueda generar una oscilación perjudicial para el proceso (en el caso de la mesa existente se precisan los cilindros de fijación porque es el peso descentrado del bastidor el que, por efecto de la gravedad, la genera oscilación).

Se elimina por tanto la necesidad de dispositivos de fijación en posición, dado que la estabilidad del álabe en el plano es máxima. La sensorización se reduce adicionalmente, simplificando por tanto el control necesario.

Considerando las necesidades establecidas de espaciado mínimo entre utillajes para la mesa actual y considerando una capacidad de 8 álabes, se haría preciso un diámetro exterior del sistema de 2560mm (5,14m<sup>2</sup>) (la mesa actual ocupa un área de 2720x1700mm (4,62m<sup>2</sup>)). El espacio requerido es ligeramente superior al actual lo que, en base a la disponibilidad de superficie en la empresa, no supone ningún problema.

### 6.2.2. Mesa circular tipo revólver

Con una filosofía similar a la planteada para la mesa circular plana, surge una variante a la que se incorpora un utillaje porta-álabes que se acopla en voladizo. Dicho utillaje permite la sustentación por un único extremo, dejando el otro libre para la inserción del álabe. Se elimina con ello la necesidad de dos pistas de apoyo, reduciéndose considerablemente el espacio ocupado.

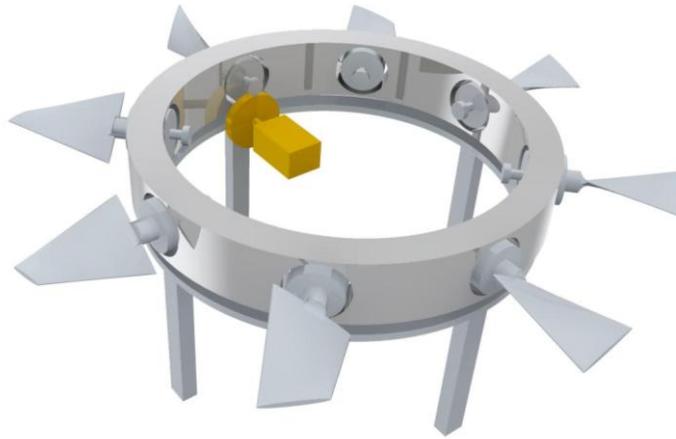


**Ilustración 52. Mesa tipo revólver con volteo por sistema mecánico**

Para la consecución del volteo del álabe se hace preciso dotar al sistema de capacidad de giro, mediante por ejemplo un sistema de rodamientos. Así desde la zona interior de la mesa se podría

Llevar a cabo el accionamiento bien a través de un sistema mecánico o mediante un actuador adicional.

A las ventajas ya comentadas para la mesa circular plana, se añadiría la eliminación de piezas grandes de geometría circular relativamente compleja. Sin embargo el uso de un sistema en voladizo comprometería la estabilidad durante el proceso.



**Ilustración 53. Mesa tipo revólver con volteo mediante actuador adicional**

Se plantean igualmente dos alternativas para la consecución del volteo del utillaje, similares a las ya planteadas para el primer rediseño explicado: por vía mecánica o mediante un actuador adicional.

### 6.2.3. Mesa lineal

Con objeto de simplificar el diseño global, se plantea una solución lineal con un principio de funcionamiento equivalente a una cinta transportadora. Se precisaría por tanto dotar a los utillajes de un sistema de apoyo y guiado sobre raíles, cuya disposición recta simplificaría el diseño.



**Ilustración 54. Mesa lineal**

Para la consecución de la máxima estabilidad se idea un diseño basado en dos pistas horizontales que guiarían a los utillajes acoplados. Para la consecución de una capacidad de carga suficiente de piezas a soldar se requiere además una configuración elíptica que permita el retorno de las

piezas, y por tanto el trabajo en ciclo continuo. El traslado de las piezas puede conseguirse mediante un sistema tipo cadena.

Las principales ventajas que se derivan de esta variante son el bajo número de actuadores necesarios, la posibilidad de desarrollo de la soldadura de un álabe completa, la estabilidad de las piezas y la simplicidad relativa de los componentes de la estructura.

Se presentan como inconvenientes sin embargo el requerido espacio para la consecución de una capacidad equivalente a la disponible actualmente o la dificultad de separación de la zona de trabajo del robot con respecto a la del operario.

#### 6.2.4. Ménsula de doble raíl

Una variante de la mesa lineal surge con el empleo de un utillaje similar al planteado para la mesa circular de tipo revólver, en que se efectúa la sustentación del álabe en voladizo. El apoyo del mismo se ejecutaría a través de un mecanismo específicamente diseñado para conseguir el guiado sobre dos raíles, en esta ocasión dispuestos de forma más próxima.

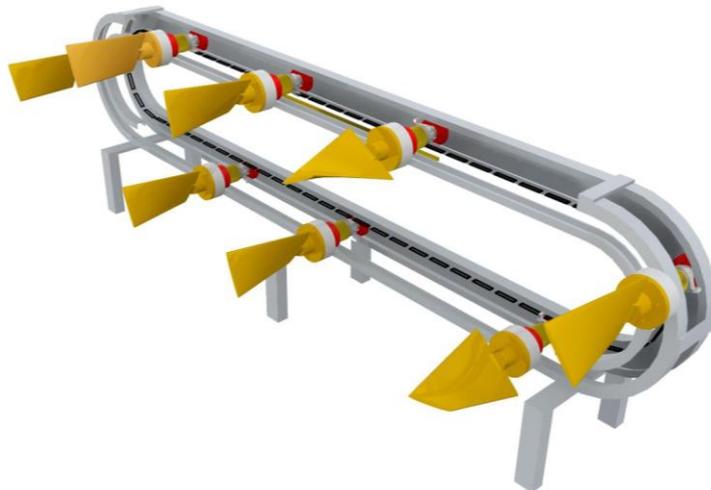


Ilustración 55. Ménsula de doble raíl

Se precisa por tanto un diseño complejo para habilitar el deslizamiento de las ruedas de soporte del utillaje sobre los raíles, sin limitar la capacidad de volteo del utillaje.

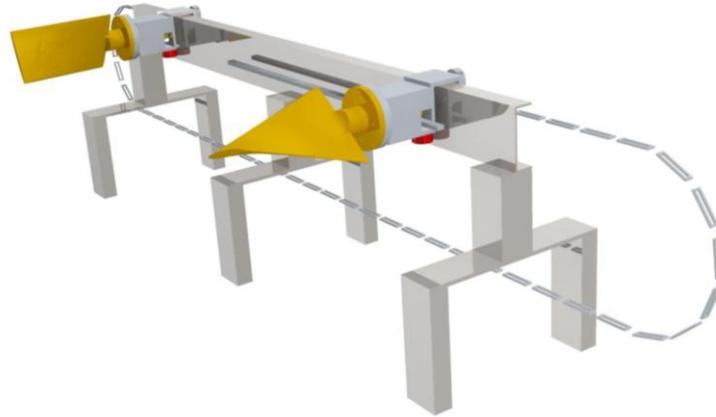


Ilustración 56. Mecanismo de soporte de los utillajes

Con esta solución se reduciría el espacio requerido para la disposición de la mesa, a costa de comprometer la estabilidad y la sencillez del diseño.

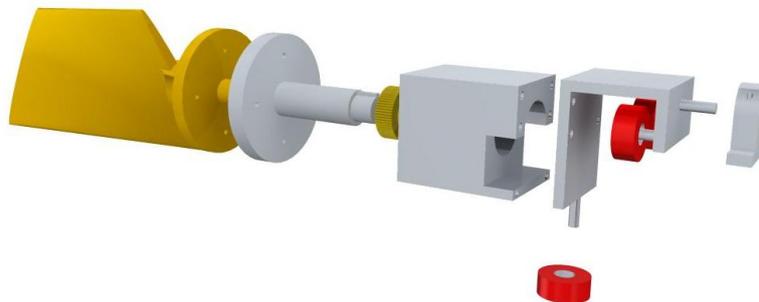
### 6.2.5. Ménsula lineal monorraíl

Una versión evolucionada de la ménsula de doble raíl, aprovechando igualmente el utillaje de sujeción del álabes en voladizo, consiste en el empleo de una única guía sobre el rodaría el bastidor móvil porta-utillajes específicamente diseñado.



**Ilustración 57. Ménsula lineal monorraíl**

De nuevo aparece la necesidad de un diseño complejo a la hora de diseñar un mecanismo de soporte del utillaje que posibilite tanto el desplazamiento como el volteo propio del álabes.



**Ilustración 58. Diseño de mecanismo porta utillajes**

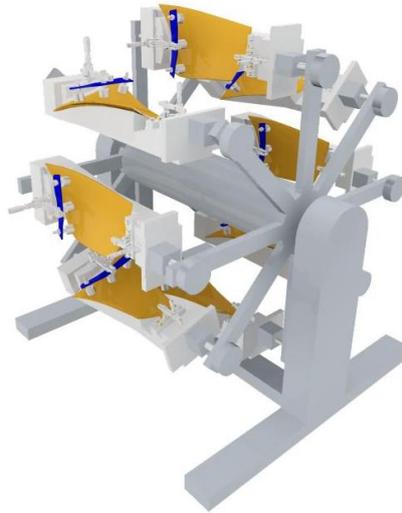
Con esta variante se eliminaría la necesidad de piezas curvadas, sin embargo se perdería la capacidad de retorno circular, por lo que se precisarían ciclos de ida y vuelta, desapareciendo por tanto el ciclo de trabajo continuo. Se precisaría igualmente un amplio espacio para la capacidad demandada perdiéndose además la filosofía de trabajo en paralelo.

### 6.2.6. Mesa circular vertical

Con la filosofía de la mesa actualmente en uso se plantea una versión evolucionada, en la que los utillajes (del tipo de los actuales) se acoplarían directamente sobre los brazos salientes de un eje rotativo (de forma similar a la tipología de una rueda de molino).

La rotación de dicho eje iría colocando los utillajes sucesivamente en la zona de soldadura posibilitándose al mismo tiempo la carga y descarga en el lado opuesto. Debido a la

configuración con brazos en voladizo, se precisaría un sistema de fijación adicional para conferir la estabilidad precisada, del estilo de los cilindros neumáticos actualmente instalados.



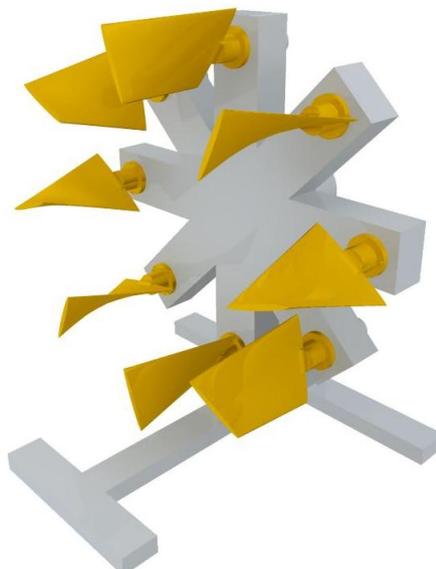
**Ilustración 59. Mesa circular vertical**

Las ventajas de este equipo residen en su geometría extremadamente compacta, en la reducción del número de actuadores y la posibilidad de desarrollo de la soldadura del álabe completa, reduciéndose además el número de trayectorias a programar.

Las principales desventajas se derivan del escaso espacio disponible tanto para manipulación de los álabes por parte del operario, como para la ejecución de la soldadura por parte del robo. Motivo también por el que se vería dificultada la incorporación de la requerida pantalla de separación.

### **6.2.7. Ménsula circular vertical**

Con el fundamento de la mesa circular vertical anteriormente explicada, se hace necesario plantear también la versión adaptada al hipotético utillaje del álabe en voladizo, permitiendo su inserción desde la zona frontal.



**Ilustración 60. Ménsula circular vertical**

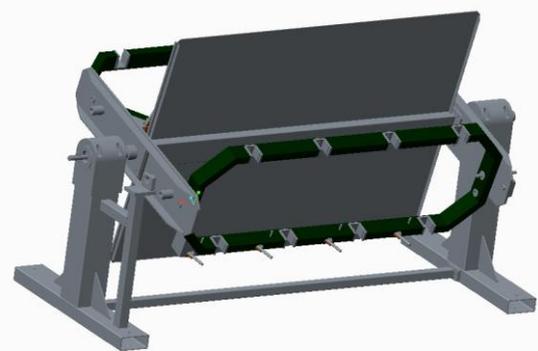
El sistema de volteo tendría un fundamento equivalente al explicado para la mesa tipo revólver, con la diferencia de que los brazos se disponen actualmente de forma radial, de manera que el eje de rotación es paralelo al suelo. Con el giro global se conseguiría disponer los álabes sucesivamente para su soldado, así como para su carga y descarga.

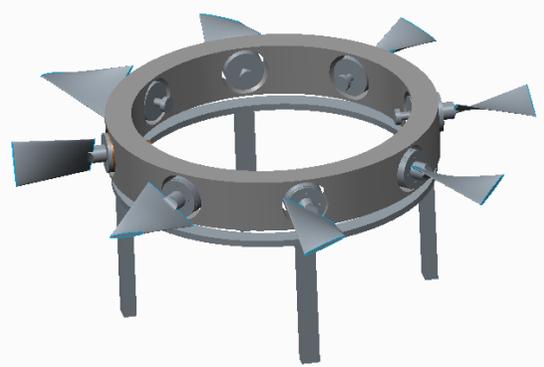
Las ventajas de este equipo son equivalentes a las de la mesa circular vertical, primando sus compactas dimensiones y el bajo número de actuadores precisados. Las principales desventajas vendrían marcadas por el escaso espacio disponible de trabajo, la dificultad de incorporación de una pantalla de separación y por la reducción de la estabilidad de los álabes durante el proceso de soldadura.

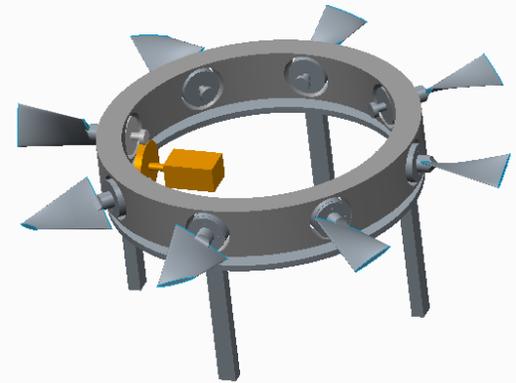
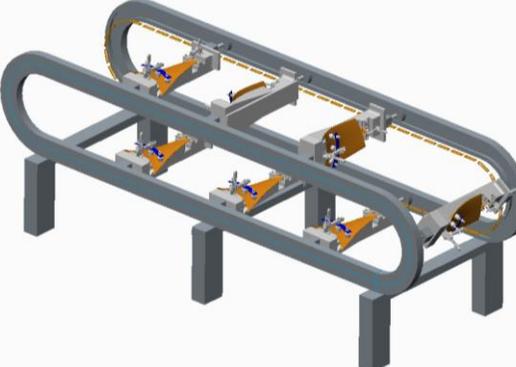
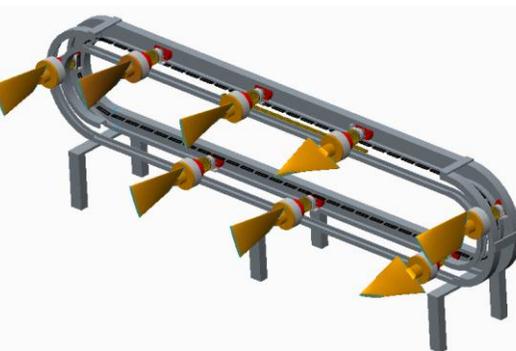
### **6.3. Resumen de alternativas**

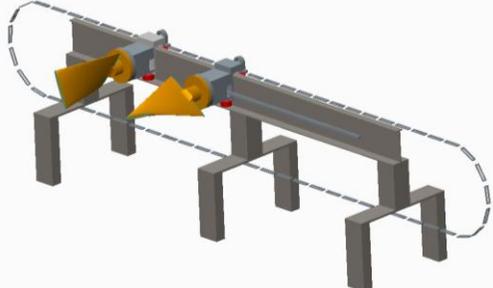
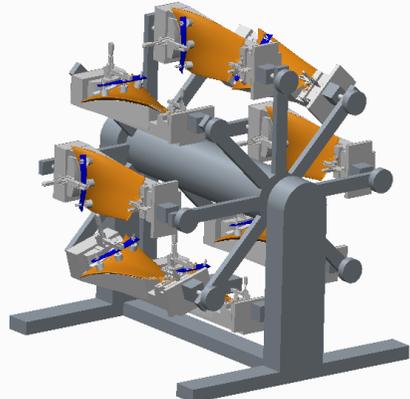
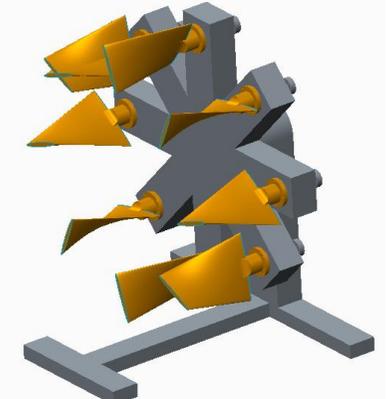
Para simplificar la tarea de evaluación y valoración de las alternativas se presenta a continuación un resumen conjunto de todas las variantes planteadas anteriormente descritas. Se sintetizan en el mismo las principales características de cada diseño, así como sus ventajas e inconvenientes.

Tabla 9. Resumen de alternativas de diseño de mejora de la mesa posicionadora

Nombre	Esquema	Características	Ventajas	Inconvenientes
<p>1. Mejoras mínimas de mesa existente</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>-Reemplazo de actuadores</li> <li>-Ajuste y calibrado</li> <li>-Protección de sistemas sensibles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Aprovechamiento completo de mesa existente</li> <li>-Compacta</li> <li>-Aislamiento completo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-6 Actuadores</li> <li>-4 trayectorias</li> <li>-Soldadura interrumpida</li> </ul>
<p>2. Modificación de mesa existente</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>-Fijación estaciones</li> <li>-Giro controlado de utillajes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Soldadura óptima</li> <li>-Robustez de estaciones</li> <li>-Aprovechamiento alto de la mesa existente</li> <li>-Aislamiento completo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-4 actuadores</li> <li>-4 trayectorias</li> <li>-Complejidad de control</li> </ul>

Nombre	Esquema	Características	Ventajas	Inconvenientes
3. Mesa circular mecánica		<ul style="list-style-type: none"> <li>-2 pistas circulares</li> <li>-Utillaje biapoyado</li> <li>-Volteo del álabe por mecanismo con giro de mesa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-1 actuador</li> <li>-2 trayectorias</li> <li>-Soldadura óptima</li> <li>-Estabilidad en el plano</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Grandes piezas circulares</li> <li>-Gran área precisada</li> <li>-Aprovechamiento nulo de mesa existente</li> </ul>
4. Mesa circular motorizada		<ul style="list-style-type: none"> <li>-2 pistas circulares</li> <li>-Utillaje biapoyado</li> <li>-Volteo del álabe por accionador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-2 actuadores</li> <li>-1 trayectoria</li> <li>-Soldadura completa</li> <li>-Estabilidad en el plano</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Grandes piezas circulares</li> <li>-Gran área precisada</li> <li>-Aprovechamiento nulo de mesa existente</li> <li>-Necesidad de sistema embragable</li> </ul>
5. Revólver mecánico		<ul style="list-style-type: none"> <li>-Bastidor circular interior</li> <li>-Utillaje empotrado</li> <li>-Volteo por mecanismo</li> <li>-Inserción del álabe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-1 actuador</li> <li>-2 trayectorias</li> <li>-Soldadura completa</li> <li>-Sin grandes piezas circulares</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Estabilidad comprometida</li> <li>-Aprovechamiento nulo de mesa existente</li> </ul>

Nombre	Esquema	Características	Ventajas	Inconvenientes
6. Revólver motorizado		<ul style="list-style-type: none"> <li>-Bastidor circular interior</li> <li>-Uillaje empotrado</li> <li>-Volteo por actuador</li> <li>-Inserción de álabe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-2 actuadores</li> <li>-1 trayectoria</li> <li>-Soldadura completa</li> <li>-Sin grandes piezas circulares</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Estabilidad comprometida</li> <li>-Aprovechamiento nulo de mesa existente</li> <li>-Necesidad de sistema embragable</li> </ul>
7. Mesa lineal		<ul style="list-style-type: none"> <li>-2 pistas horizontales</li> <li>-Movimiento por cadena</li> <li>-retorno circular</li> <li>-Volteo de álabe por mecanismo/actuador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-1/2 actuadores</li> <li>-2 /1 trayectoria</li> <li>-Soldadura completa</li> <li>-Estabilidad en el plano</li> <li>-Sin piezas complejas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Espacio horizontal requerido</li> <li>-Curvatura precisada para retorno</li> <li>-Aprovechamiento nulo de mesa existente</li> </ul>
8. Ménsula de doble raíl		<ul style="list-style-type: none"> <li>-1 raíl + 1 pista apoyo</li> <li>-Movimiento por cadena</li> <li>-Sin retorno circular</li> <li>-Ida y vuelta</li> <li>-Uillaje en voladizo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-1 actuador</li> <li>-2 trayectorias</li> <li>-Soldadura completa</li> <li>-Sencillez de carga y descarga</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Complejidad mecánica del apoyo</li> <li>-Curvatura precisada para retorno</li> <li>-Aprovechamiento nulo de mesa existente</li> </ul>

Nombre	Esquema	Características	Ventajas	Inconvenientes
9. Ménsula monorraíl		<ul style="list-style-type: none"> <li>-1 raíl</li> <li>-3 ruedas de apoyo</li> <li>-Uillaje en voladizo</li> <li>-Inserción de álabes</li> <li>-Desplazamiento por cadena</li> <li>-Volteo por mecanismo/actuador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Sencillez de pistas</li> <li>-1/2 actuadores</li> <li>-2/1 trayectorias</li> <li>-Soldadura completa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Sin ciclo de retorno</li> <li>-Espacio horizontal requerido</li> <li>-Aprovechamiento nulo de mesa existente</li> </ul>
10. Mesa circular vertical		<ul style="list-style-type: none"> <li>-Molino vertical</li> <li>-2 aspas</li> <li>-Uillaje biapoyado</li> <li>-Giro motorreductor</li> <li>-Volteo por actuador</li> <li>-Volteo mecánico o por actuador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-1/2 trayectorias de robot</li> <li>-2/1 actuadores</li> <li>-Soldadura óptima</li> <li>-Compacto</li> <li>-Control sencillo</li> <li>-Aprovechamiento parcial mesa existente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Estabilidad comprometida</li> <li>-Pantalla de aislamiento difícilmente instalable</li> </ul>
11. Ménsula circular vertical		<ul style="list-style-type: none"> <li>-Disposición vertical</li> <li>-Uillaje en voladizo</li> <li>-Inserción del álabes</li> <li>-Volteo mecánico o por actuador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-1/2 trayectorias de robot</li> <li>-2/1 actuadores</li> <li>-Soldadura óptima</li> <li>-Compacto</li> <li>-Control sencillo</li> <li>-Aprovechamiento parcial mesa existente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Estabilidad comprometida</li> <li>-Complejidad mecánica de sistema de aspas</li> <li>-Pantalla de aislamiento difícilmente instalable</li> </ul>

## 6.4. Valoración de alternativas

En base a los requerimientos y deseos especificados a lo largo de todo el trabajo y, específicamente en el apartado 5.2, se ha llevado a cabo una ponderación en base a diferentes criterios de las diferentes alternativas planteadas para la mejora del diseño de la mesa posicionadora óptima. Se pretende con ello facilitar su comparación y, posibilitar finalmente la elección de la solución más adecuada. Para este análisis se han escogido como criterios a valorar:

- Trayectorias del robot: cantidad y complejidad de las trayectorias que es preciso programar en el robot con el diseño evaluado para la soldadura del álabe
- Optimización del proceso: se evalúa la posibilidad del desarrollo del proceso de soldadura en las condiciones óptimas, es decir, el soldeo completo de cada álabe individual, la posición idónea de la pistola de soldadura, etc.
- Volumen: dimensiones ocupadas por la mesa posicionadora
- Complejidad mecánica: se analiza no sólo la dificultad de fabricación y adquisición de componentes, sino también otros criterios como su montaje, cantidad de piezas del diseño, etc.
- Actuadores precisados: evalúa la cantidad y tipología de actuadores precisados para lograr la automatización del proceso
- Estabilidad: capacidad del sistema de permanecer estable durante el desarrollo del proceso de soldadura
- Control: complejidad de los sistemas de control precisados para lograr la automatización del proceso
- Aprovechamiento de la mesa existente: posibilidad de reutilización de las piezas y componentes de la mesa existente
- Aislamiento: capacidad de separación del espacio de soldadura del de carga y descarga

Debido a la heterogeneidad de los criterios se asigna un porcentaje de peso a cada uno, para determinar así la importancia relativa individual con respecto al resto. De esta manera y siempre buscando la máxima calidad del producto final obtenido y la comodidad del operario, se consideran como criterios más importantes la optimización del proceso de soldadura, la simplificación de las trayectorias programadas y la complejidad del diseño. Por el contrario, los criterios con menor influencia son el volumen ocupado y el aprovechamiento de la mesa existente.

Los resultados obtenidos pueden apreciarse en la tabla mostrada a continuación:

Tabla 10. Valoración de criterios para selección de alternativa óptima

Id.	Nombre	Trayectorias robot	Optimización de proceso	Volumen	Complejidad mecánica	Actuadores precisados	Estabilidad	Control	Aprov. mesa existente	Aislamiento	Total	Orden
Ponderación		20%	22%	7%	13%	10%	5%	8%	5%	10%		
1	Mejoras existente	1	1	3	3	1	1	2	4	4	193	11
2	Existente modific.	2	3	3	2	2	2	1	3	4	246	10
3	Circular mecánica	3	4	1	2	4	4	4	1	3	308	3
4	Circular motorizada	4	4	1	2	3	4	3	1	3	310	1
5	Revólver mecánico	3	4	4	1	4	3	4	1	2	301	5
6	Revólver motorizado	4	4	4	1	3	3	3	1	2	303	4
7	Mesa lineal	3	4	2	2	3	4	3	1	2	287	7
8	Ménsula doble raíl	3	4	2	1	4	3	4	1	2	287	8
9	Ménsula monorraíl	3	4	1	2	3	3	4	1	2	283	9
10	Mesa circular vertical	3	4	4	3	3	4	3	2	1	309	2
11	Ménsula circular vert.	3	4	4	2	3	3	3	2	1	291	6

Para la valoración de los diferentes criterios se ha adoptado la siguiente escala:

1	Muy malo
2	Malo
3	Bueno
4	Muy bueno

De los resultados obtenidos puede concluirse que la solución óptima para la mesa posicionadora es la alternativa 4. *Mesa circular motorizada*, en la que se disponen los álabes sobre utillajes colocados de forma radial sobre un bastidor interior y apoyados también sobre otro exterior. La segunda mejor opción resulta ser la 3. *Mesa circular mecánica* de características prácticamente similares.

Los puntos fuertes de estas alternativas residen en la idoneidad del proceso de soldadura desarrollado, así como en el bajo número de actuadores precisados, que simplifica su control. Debido a la importancia dada a la consecución de la máxima calidad en la soldadura, esta opción resulta ser la idónea, siendo sus puntos débiles (gran espacio requerido, o complejidad de piezas) perfectamente asumibles y/o solucionables.

La tercera mejor opción resulta ser la 10. *Mesa circular vertical*, con una tipología similar a un molino. Su punto fuerte reside en lo compacto de su diseño, además de la optimización de las posiciones de soldadura.

Como opciones menos recomendables aparecen las fundamentadas en el aprovechamiento de la mesa existente. Ello se debe a la elevada importancia dada a los criterios de optimización del proceso de soldadura para obtención de un producto final de alta calidad. Dichas soluciones se ven principalmente penalizadas por la necesidad de un elevado número de trayectorias y/o a la interrupción del proceso de soldadura.

Las alternativas de tipología lineal no consiguen solucionar de forma óptima el posicionamiento de los álabes, además de generarse una elevada complejidad mecánica para conseguir un ciclo continuado de trabajo.

Por último, los modelos tipo revólver se ven penalizados por la baja estabilidad ofrecida que requeriría de más actuadores para ser solucionada, resultando su ventaja de reducción del espacio requerido de baja importancia global.

## 7. SOLUCIÓN ADOPTADA

De entre las tres alternativas mejor valoradas en el capítulo anterior, se ha elegido teniendo en cuenta la valoración de otras partes implicadas en el diseño (operario, jefe de taller y tutor de empresa, tutor académico) finalmente la opción de mesa circular plana en detrimento de la vertical. El accionamiento de volteo será sin embargo ejecutado mediante una combinación mecánica y por actuador auxiliar.

Se procede en el presente capítulo a la descripción íntegra del diseño mecatrónico adoptado para conseguir la funcionalidad deseada.

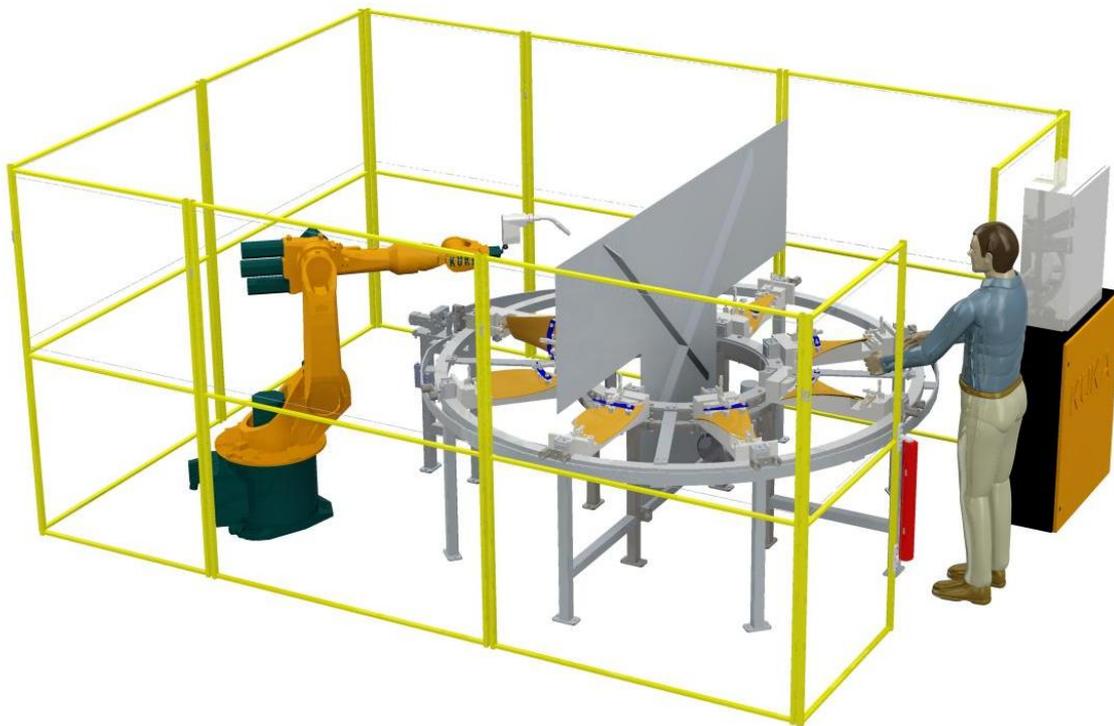


Ilustración 61. Diseño optimizado de la célula de soldadura de álabes

### 7.1. Cálculo de la capacidad mínima

Como punto de partida para el desarrollo del diseño se decide calcular el número óptimo de álabes que deben poder ser cargados en la mesa posicionadora. En base a ello se llevará a cabo el diseño ajustado a los requerimientos, quedando así determinadas las dimensiones mínimas.

La capacidad mínima requerida viene marcada por el tiempo de enfriamiento controlado requerido sobre el utillaje para evitar la destorsión por efecto de las tensiones generadas en la refrigeración.

En el hipotético caso de que dicho enfriamiento controlado no fuese requerido, la mesa podría reducir su capacidad a dos unidades, de manera que el proceso permitiría la descarga del álabe soldado inmediatamente después de ser soldado.

Sin embargo, debido a la exigencia de conservación de la geometría a pesar del enfriamiento, se precisa que el álabe se mantenga fijado sobre el utillaje un tiempo mínimo aproximado de 3 minutos a temperatura ambiente.

Según el funcionamiento previsto para la mesa, el tiempo de enfriamiento controlado será equivalente al tiempo empleado en trasladar el álabe soldado desde la zona de trabajo del robot a la de descarga. Este período vendrá marcado a su vez por la duración del proceso de soldadura de cada álabe.

Ello conduce a la elaboración de una ecuación sencilla que posibilita el cálculo de la capacidad requerida en base a los tiempos de soldadura y enfriamiento:

$$T_{enf} = \frac{(Capacidad - 2)}{2} \cdot T_{sold} \quad (1)$$

Donde:

$T_{enf}$  es el tiempo mínimo de enfriamiento  
 $T_{sold}$  es el tiempo empleado en la soldadura  
 $Capacidad$  es la cantidad de álabes que carga la mesa simultáneamente

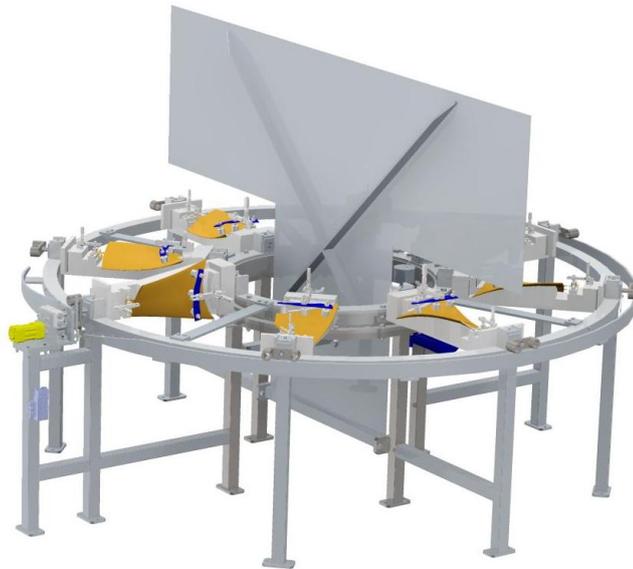
Tras la ejecución de un estudio de los tiempos empleados en la célula actual detallados más adelante en el capítulo 9.1, se obtiene una capacidad mínima requerida de 6 álabes.

Sin embargo buscando un diseño completamente simétrico entre la posición del puesto de soldadura y el de carga y descarga se decide elevar a 8 dicha capacidad, resultando así equivalente a la mesa existente.

Se cumple así también el fundamentado en que se basó el diseño de la actual mesa: una capacidad de carga múltiplo de los álabes instalados en cada ventilador (8 por defecto), de manera que cada ciclo de trabajo habilita la construcción de una unidad de ventilación. Pese a ser cumplido, este requerimiento queda ahora desfasado dado que con el diseño propuesto se consigue un ciclo ininterrumpido, sin necesidad de tiradas de un número concreto de álabes.

## 7.2. Diseño mecánico

Se procede a continuación a la descripción detallada del diseño mecánico de la mesa posicionadora planteada como solución óptima, basada en la alternativa de mesa circular plana, con volteo previsto mediante un actuador adicional.



**Ilustración 62. Mesa posicionadora de álabes diseñada**

La mesa posicionadora está constituida por un bastidor circular fijo sobre el cual se dispone uno móvil que tiene capacidad de rodadura sobre el primero, mediante los elementos que posteriormente serán descritos. El principio de funcionamiento del equipo es equivalente al de un gran rodamiento axial.

Para la sustentación de cada uno de los ocho utillajes porta-álabes en sus dos extremos, se disponen de forma radial y es por ello que se requieren dos pistas de apoyo: una interior y otra exterior.

Para posibilitar una altura de trabajo adecuada al robot, se instalan las pistas de rodadura del bastidor fijo sobre pies constituidos por perfiles tubulares de acero, resultando una altura aproximada de trabajo final de 1100mm.

Para la elección de las dimensiones principales de las pistas circulares, se tiene en consideración el establecimiento de una separación mínima entre utillajes equivalente a la existente en la mesa actual. Se busca con ello mantener un espaciado adecuado para la manipulación y trabajo sobre los álabes tanto por parte del robot como del usuario.

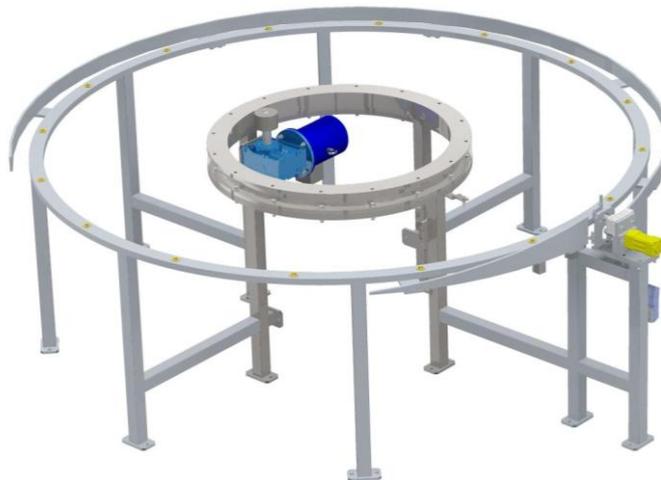
La separación medida asciende a 450mm entre los ejes de rotación de los utillajes. Estableciendo un diámetro de 1000 mm para el aro interior, la instalación de 8 álabes genera una separación suficiente entre ellos de 425mm en la zona más interna. El otro pilar del diseño ha sido la adopción de medidas adecuadas que posibiliten el uso de rodamientos de giro comerciales disponibles en el mercado.

### **7.2.1. Bastidor inferior**

Las dos pistas de rodadura que constituyen el bastidor inferior, fabricadas con chapas de 12mm, quedan unidas mediante perfiles tubulares soldados entre sus patas de apoyo. Se dispone además una placa de en cada una de las patas para posibilitar el ajuste y fijación al suelo, permitiendo así la corrección de posibles imprecisiones en la planitud del mismo.

Sobre la pista interior se fijará una corona de giro comercial de la serie I.22.A de 999mm de diámetro exterior. Dispone además de un dentado interno que permitirá el accionamiento del giro mediante el motorreductor seleccionado para tal efecto. La corona consta de 140 dientes rectos

de módulo 6. La corona de giro será fijada al aro interior del bastidor fijo mediante 16 pernos de M12. Se hace por tanto preciso mecanizar tanto la pista como la propia corona.



**Ilustración 63. Bastidor inferior**

Para el accionamiento del giro se decide emplear un engranaje cilíndrico recto de 15 dientes, con un diámetro primitivo de 90mm acoplado sobre un eje instalado sobre el reductor. En el *Anexo I: Cálculos justificativos* se verifica que la fuerza generada sobre el engranaje es admisible por el reductor elegido y no se precisa por tanto un soporte adicional.

El soporte del conjunto motorreductor al bastidor se ejecuta mediante una placa de sustentación soldada a una pata del aro interior. A ella se fija el motorreductor mediante tornillos.

Para la disposición de la rodadura de la pista exterior se había planteado en un primer diseño el empleo de un rodamiento comercial. Sucede que para las dimensiones requeridas de 2300mm de diámetro, los rodamientos comerciales disponibles son excesivamente robustos, teniendo en cuenta la aplicación concerniente.

Es por ello que, en su lugar, se opta por instalar bolas de transferencia sobre la pista externa, posibilitando así la rodadura del bastidor superior. Por cuestiones de generación de un apoyo adecuado se decide emplear un total de 16 bolas de transferencia, dado que el peso estimado para la estructura es sobradamente asumido por los elementos, no siendo por tanto un factor determinante.

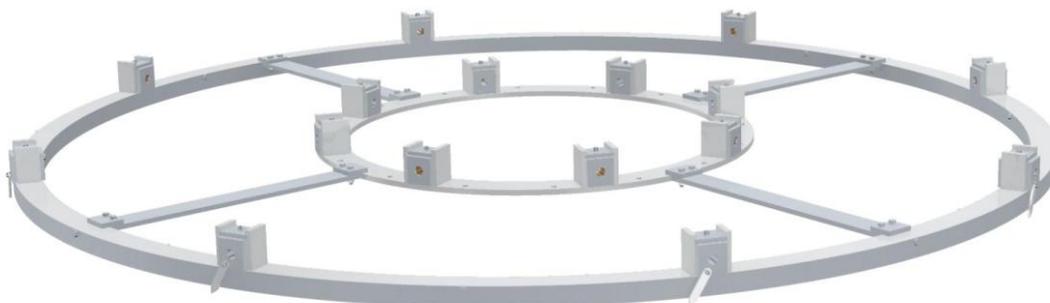


**Ilustración 64. Gama de corona de giro (izqda.) y bola de transferencia (dcha.) elegidas**

Al bastidor inferior también se fijan los sistemas de volteo del utillaje que serán descritos en el apartado 7.2.4.

### 7.2.2. Bastidor superior

Para dotar al equipo de la precisada movilidad, se instala un bastidor superior móvil que soportará los utillajes porta-álabes y que rodará sobre el bastidor inferior. Para ello se monta una pista interior de espesor 12mm que irá fijada al aro superior de la corona (que dispone del dentado para ser accionado). La unión se realizará a través de pernos de M12.



**Ilustración 65. Bastidor superior**

Para el caso de la pista exterior, se dispone una llanta de 15mm de espesor, con un diámetro exterior de 2336mm que rodará sobre las bolas de transferencia acopladas en el bastidor inferior.

El bastidor superior móvil queda constituido al ser unidas las dos pistas mediante cuatro tirantes radiales unidos mediante dos tornillos a cada aro. Se consigue así la transmisión del giro recibido por el aro interior al exterior.

Para el montaje de los utillajes sobre la mesa, se instalan sobre las pistas cajetines formados por dos chapas laterales verticales soldadas a las pistas, que habilitarán el espacio necesario para el alojamiento del cubo de pivotamiento de los ejes de los ocho utillajes. La fijación de estos últimos se realizará mediante una tapa insertada en las ranuras habilitadas para tal efecto, quedando en posición mediante un tornillo de apriete. El sistema es equivalente al actualmente disponible en la mesa en funcionamiento.

El cubo de pivotamiento consta de un alojamiento interior en el que se insertan casquillos cilíndricos que facilitan el giro del eje del utillaje. Se plantea un diseño para el cubo tal que se dispone un resalte que evita la salida por un extremo, mientras que por el otro, es el propio utillaje el que impide su descolocación.



**Ilustración 66. Sistema de fijación del cubo de pivotamiento del utillaje**

El bastidor superior consta de otros elementos adicionales importantes para el correcto funcionamiento global de la mesa. Por un lado se disponen dos chapas de 1mm de espesor fijadas en la periferia del aro exterior mediante tornillos roscachapa. Su cometido es cubrir el espacio existente entre el aro superior y el inferior para evitar así la entrada de suciedad u otros elementos que pudieran deteriorar los elementos de rodadura, asegurando en todo momento la buena movilidad de los mismos.

Por otro lado, se instalan sobre los cubos de fijación de los utillajes sistemas de indicación de la posición de la mesa, que actuarán sobre los sensores finales de carrera dispuestos para tal efecto, y cuyo principio de funcionamiento será detallado en el apartado 7.4. Los indicadores son chapas fijadas a cada cubo montado sobre el aro exterior mediante tornillos posibilitando así el ajuste para la consecución del funcionamiento idóneo.

### 7.2.3. Pantalla de separación

Uno de los aspectos fundamentales de la célula es el mantenimiento de la seguridad, y es por ello que se instala una pantalla central de separación en forma de T sustentada por dos perfiles tubulares, que permite la separación completa del espacio de trabajo del robot de la zona de carga y descarga. Se ejecuta con chapa de acero de 3 mm de espesor, sobre la que se sueldan una serie de elementos de refuerzo.

#### 7.2.3.1. Análisis MEF

Debido a las amplias dimensiones de la pantalla y su mínimo espesor, se hace preciso el diseño de los elementos de refuerzo adecuados para evitar, sobre todo, posibles deformaciones excesivas por impacto.

Para la elección de la solución óptima se ha decidido ejecutar un análisis por el método de los elementos finitos mediante el software ANSYS. De esta manera, se plantean tres diferentes soluciones a evaluar, cuyos resultados de deformaciones serán comparados para la determinación de la solución idónea.

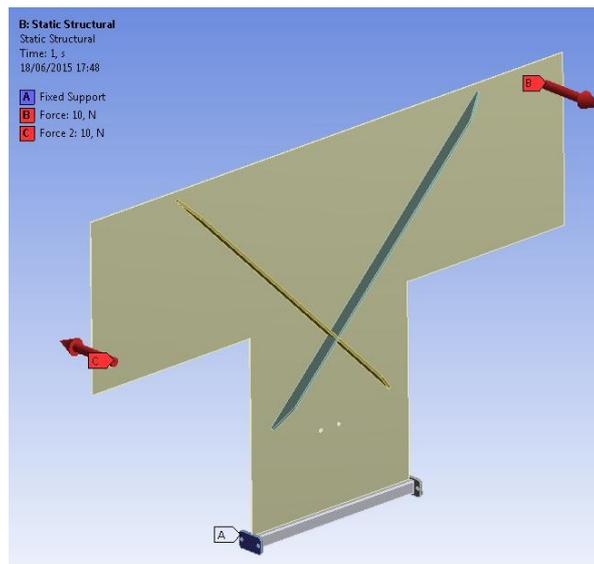
Se plantea: una pantalla sin ningún tipo de refuerzos, un modelo reforzado perimetralmente (de forma similar a como está reforzada la pantalla actual de la mesa) y otra versión con refuerzos en forma de cruz.



**Ilustración 67. Pantalla sin refuerzos (izqda.), con refuerzos perimetrales (centro) y en cruz (dcha.)**

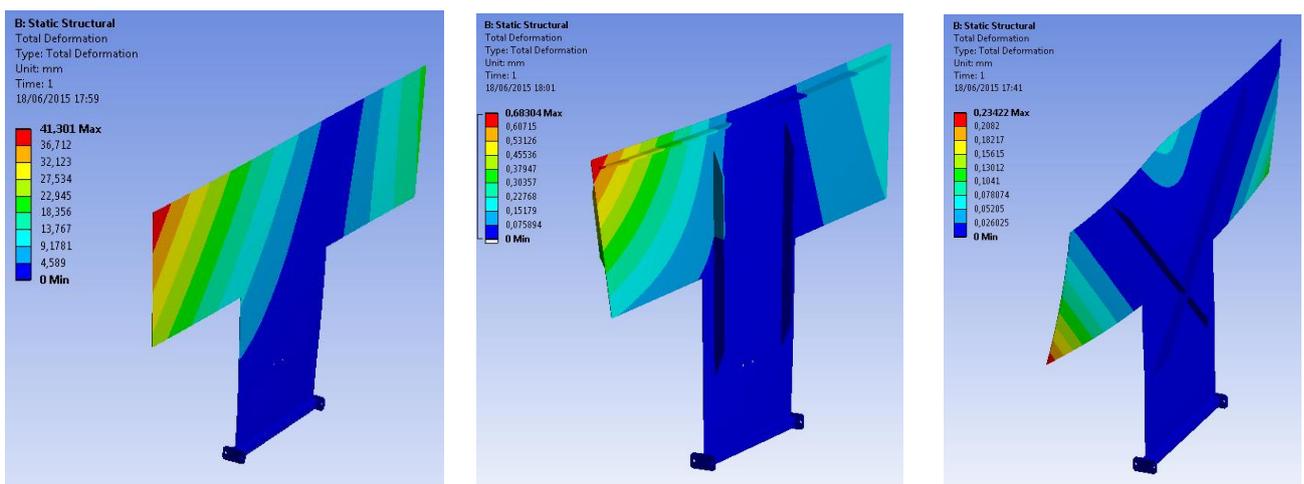
El análisis planteado evalúa las deformaciones máximas alcanzadas por la pantalla, estando fijada mediante el perfil inferior habilitado para tal efecto, y siendo aplicadas dos fuerzas

opuestas de 1N en la esquina superior izquierda y en la inferior derecha de la pantalla. Se busca con ello la generación de una torsión crítica que permita evaluar la respuesta de cada diseño.



**Ilustración 68. Restricciones y cargas impuestas en los análisis**

Se muestran a continuación los resultados obtenidos en cada caso.



**Ilustración 69. Deformación de pantalla sin refuerzo(izqda.), con refuerzo perimetral(centro) y en cruz (dcha.)**

De los resultados se obtiene la clara reducción de las deformaciones con la incorporación de refuerzos, lo que justifica claramente su incorporación. Así, la deformación máxima para el diseño sin refuerzos asciende a 41mm, viéndose reducido a 0,68mm y 0,23mm para los diseños con refuerzos perimetrales y en cruz respectivamente.

En la comparativa entre las dos alternativas de refuerzo, se aprecia una mayor eficiencia en el caso del diseño en cruz, dado que con menor cantidad de material de refuerzo se consigue una mayor rigidización de la estructura.

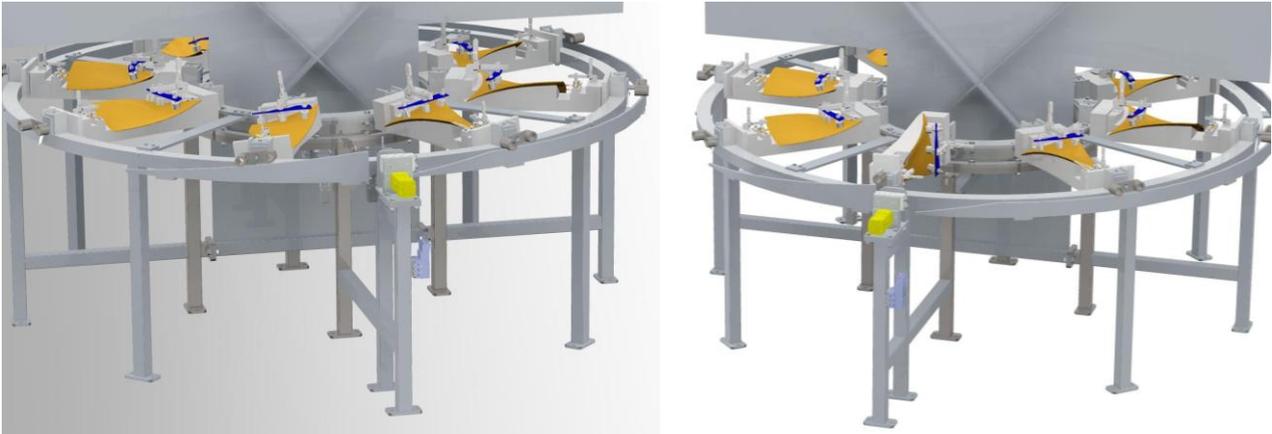
Es por ello que se decide adoptar esta solución como la óptima.

## 7.2.4. Sistema de volteo del utillaje

Para la consecución del volteo del utillaje en la posición de soldadura que permita ejecutar el proceso sobre los dos perfiles del álabe, se diseña un sistema fundamentado en las dos alternativas seleccionadas como solución idónea para la mesa. De esta manera, se emplea un conjunto de seguidor-guía para la aproximación a la posición deseada en cada momento, mientras que el indexado en la posición exacta de soldadura, y el posterior volteo se ejecutan mediante dos actuadores neumáticos.

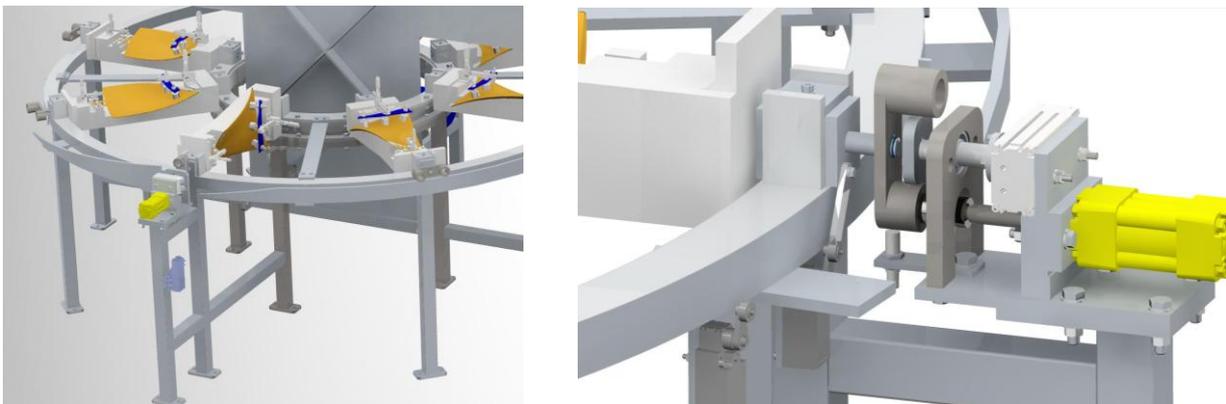
### 7.2.4.1. *Descripción del funcionamiento*

El utillaje se dispone en posición horizontal en la zona de carga y descarga gracias al sistema mecánico de seguidor-guía dispuesto. Con el giro de la mesa, el utillaje que pasa a la zona de soldado, es forzado mediante guía a girar hasta su posición inicial de soldadura completamente determinada gracias al diseño, que posteriormente será detallado. Una pieza específicamente diseñada acoplada al actuador de volteo recibe al brazo del utillaje, ajustando aún más su posición.



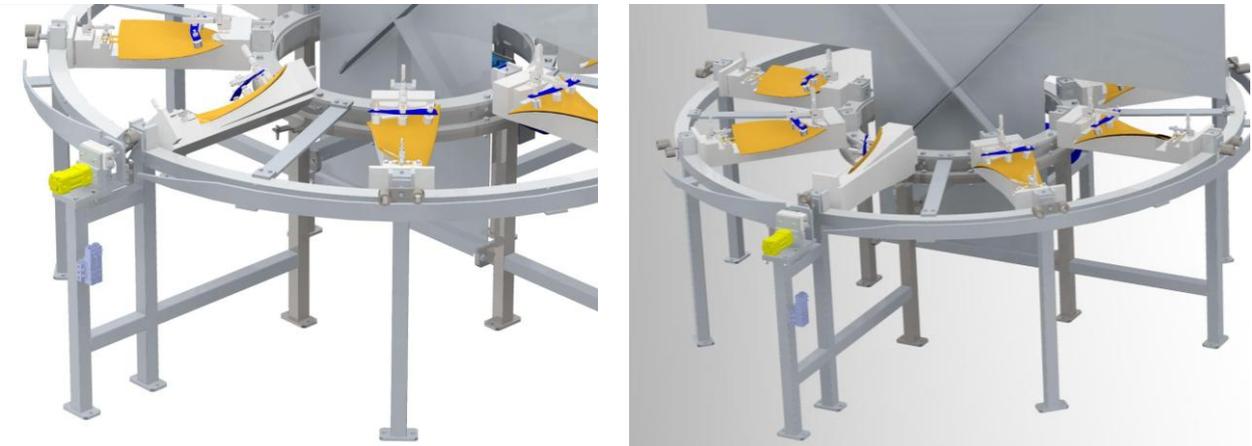
**Ilustración 70. Inicio de giro (izqda.) y aproximación a posición inicial (dcha.)**

Una vez detenido el giro de la mesa y previamente al inicio de la soldadura, se procede al indexado del brazo mediante un bulón acoplado a un cilindro neumático. Gracias al mecanizado con ajuste fino del bulón y su alojamiento, se consigue una elevada precisión en la colocación del álabe, además de quedar fijado su movimiento durante el proceso de soldadura. Se satisfacen así dos necesidades principales establecidas como requisitos.



**Ilustración 71. Posición de soldadura 1 (izqda.) y detalle de indexado (dcha.)**

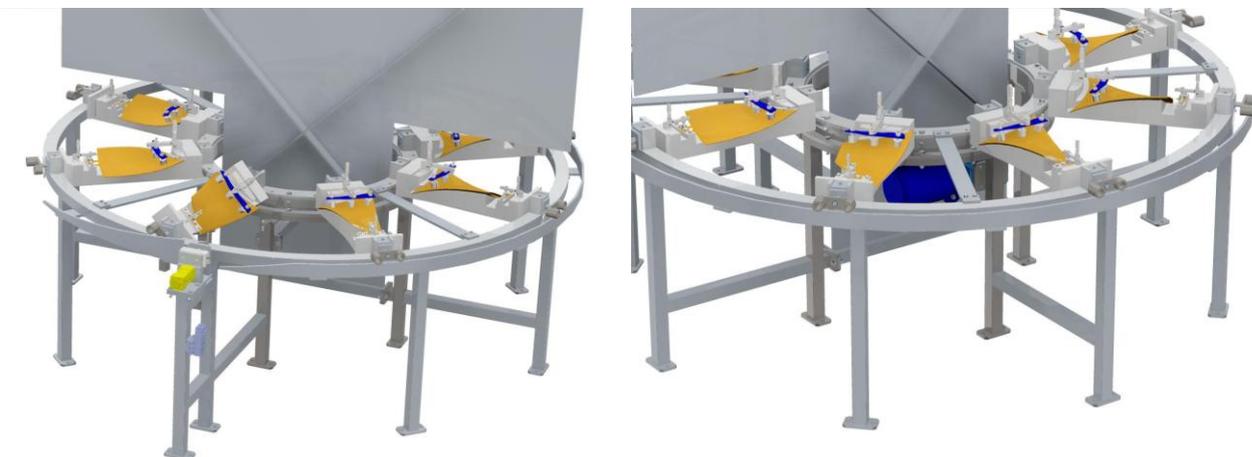
Tras la ejecución del primer cordón de soldadura, se procede a la extracción del bulón, para liberar el giro del utillaje. Mediante el otro actuador neumático se efectúa un giro de 180° que se transmite al utillaje a través del brazo de volteo, logrando así disponer el segundo perfil para su soldadura.



**Ilustración 72. Volteo (izqda.) y posición de soldadura 2 (dcha.)**

Se repite entonces el proceso de indexado para completa fijación y determinación de la posición final de trabajo, tras lo cual da comienzo el segundo proceso de soldadura.

Completada la fabricación del álabe, se activa el giro de la mesa que es aprovechado para, mediante una segunda guía, llevar al utillaje a la posición horizontal que permita la descarga y nueva carga de álabe en la zona del operario.



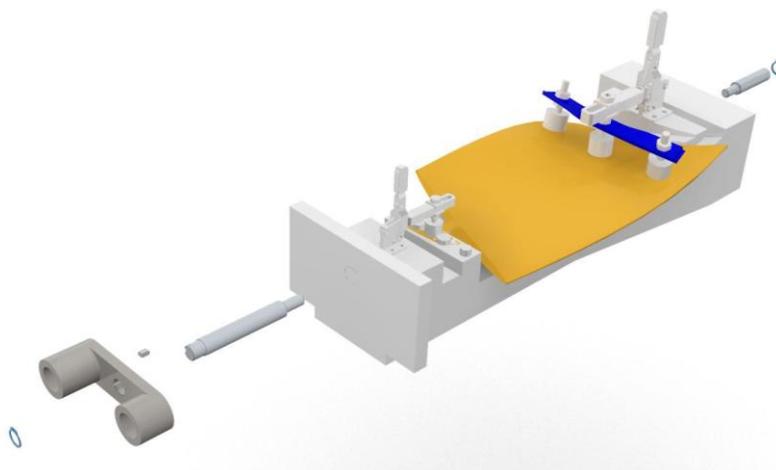
**Ilustración 73. Puesta en posición horizontal (izqda.) y llegada a zona de descarga en posición (dcha.)**

Simultáneamente se produce el retorno del actuador de giro a su posición de reposo para recibir al nuevo utillaje que contiene al siguiente álabe a ser soldado.

#### 7.2.4.2. Sistema de transmisión del giro al utillaje

Para posibilitar la transmisión del giro al utillaje, se hace preciso rediseñar el eje de un extremo del mismo, de manera que se posibilite la incorporación de una pieza adicional que reciba el movimiento.

Cabe destacar que para la fijación de los ejes de giro al utillaje, éste dispone de insertos de metal roscados fijados al cuerpo de la matriz. Ello posibilita el acoplamiento de un eje diseñado específicamente según los requerimientos precisados.



**Ilustración 74. Sistema de transmisión de giro al utillaje**

El eje diseñado dispone en uno de sus extremos de un roscado para ejecutar la mencionada fijación al utillaje. Será recomendable aplicar fijador a la unión para evitar posibles aflojamientos. En el otro extremo se dispone un eje de diámetro 16mm con ajuste fino, junto con un chavetero para transmisión del giro recibido por el brazo al utillaje. Se dispone además de una ranura para incorporación de un anillo elástico de seguridad DIN471 para la fijación axial.

Para lograr transmitir el giro al utillaje, se plantea un sistema de brazo, que permite además la ejecución del indexado en posición de soldadura para definición exacta de la posición y fijación durante el proceso.

Se diseña por tanto una pieza con dos salientes sobre los que actuará el dispositivo de giro, y también contactará con las guías instaladas, explicadas más adelante. La pieza dispone de dos orificios que posibilitan el indexado mediante un bulón actuado por un cilindro neumático.

Los salientes mencionados del brazo del utillaje permiten forzar el giro hasta la primera posición de soldadura. Para asegurar que dicha posición es siempre la misma, se hace una distinción entre los salientes, siendo uno de ellos más largo.

#### 7.2.4.3. Sistema de volteo e indexado

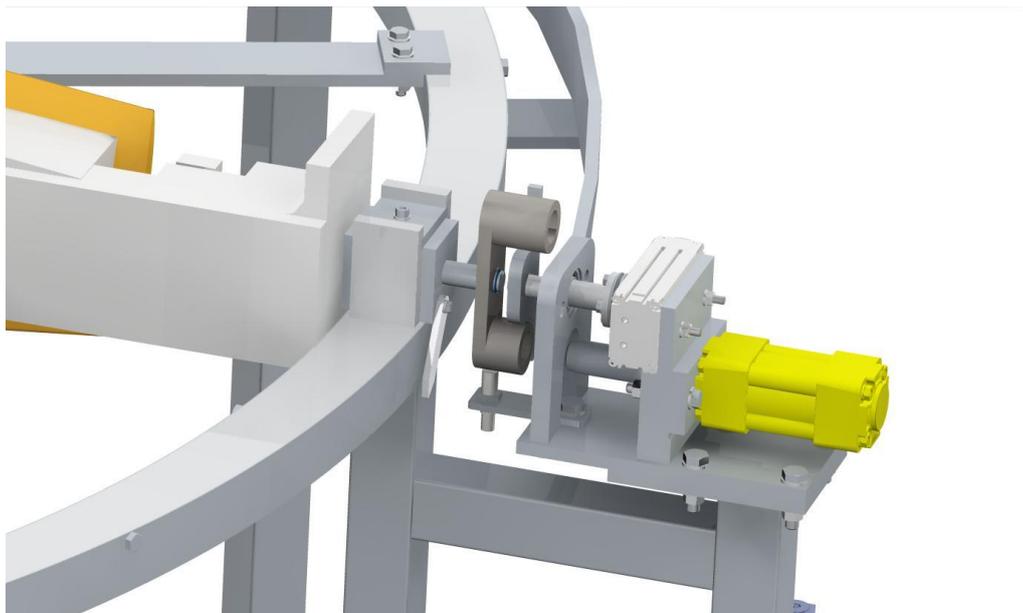
Con objeto de conseguir un proceso de soldadura idóneo, se hace preciso conseguir una posición exacta y repetible de los álabes, así como el volteo de los mismos para el desarrollo sucesivo de los dos cordones necesarios.

Para ello se ha diseñado un sistema de volteo e indexado basados en actuadores neumáticos. Para la consecución de la fijación en posición del utillaje, de una manera precisa y evitando oscilaciones durante el proceso, se decide emplear un bulón de indexado actuado por un cilindro neumático que se inserta en los orificios del brazo de giro unido al utillaje anteriormente explicado. El mecanizado con tolerancias ajustadas tanto de bulón como de los tetones de indexado posibilitan una precisión extrema en el posicionado del álabe, consiguiéndose así uno de los objetivos principales planteados para la célula, que es la equiparación de la precisión de la mesa con la propia del robot.

Se consigue así reducir al mínimo el error de posicionado, facilitando las tareas de programación y disminuyendo las piezas erróneamente soldadas.

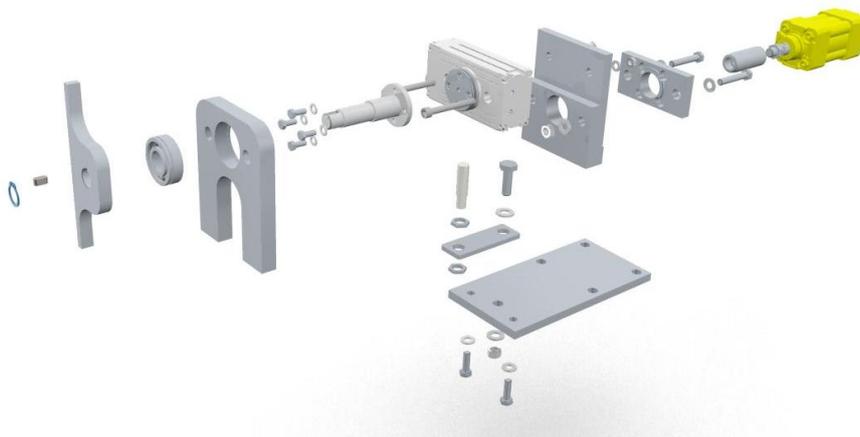
Para la ejecución del volteo del utillaje, se ha diseñado un sistema basado en un actuador neumático de giro que posibilita una rotación de 180°. A éste se acopla un eje que permite el montaje de un bazo volteador en su extremo. Dicha pieza recibirá al brazo acoplado en el utillaje anteriormente explicado, para en el momento preciso, llevar a cabo un giro de 180° volteando por completo el álabe.

En esta segunda posición de soldadura, se produciría de nuevo el indexado de fijación que otorga la precisión requerida.



**Ilustración 75. Sistema de volteo e indexado**

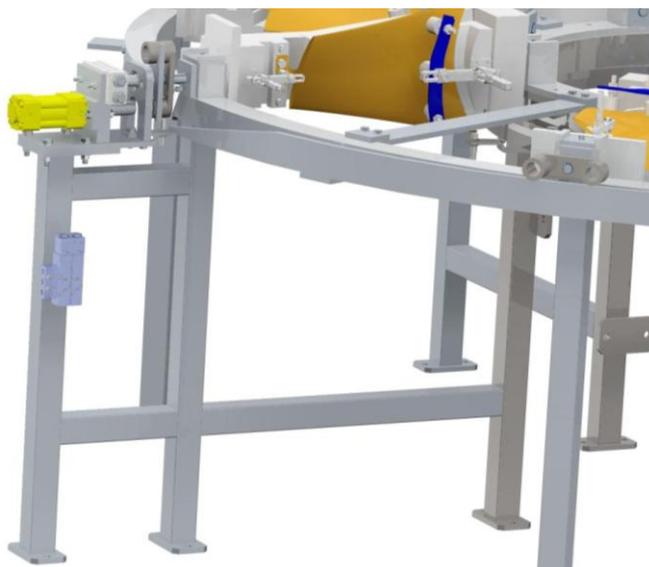
En base a la sensibilidad inherente de los componentes neumáticos, se plantea además un sistema de soporte del eje de transmisión del giro a través de un rodamiento, de manera que el posible impacto (que se minimizará mediante la reducción de la velocidad en la aproximación) sea absorbido por el bastidor.



**Ilustración 76. Componentes del conjunto de volteo e indexado**

La unidad completa de volteo e indexado se sustenta sobre una chapa base que se fija mediante tornillería a un perfil vertical a modo de pie soporte. Este último es fijado a una pata del bastidor exterior mediante dos perfiles tubulares horizontales.

Se aprovecha también el pie de soporte para el montaje de las electroválvulas que alimentan a los actuadores neumáticos mediante una pieza especialmente diseñada, adaptada a la base de las mismas.



**Ilustración 77. Pie soporte de la unidad de volteo e indexado, y grupo de electroválvulas**

#### 7.2.4.4. Sistema de guiado a posición

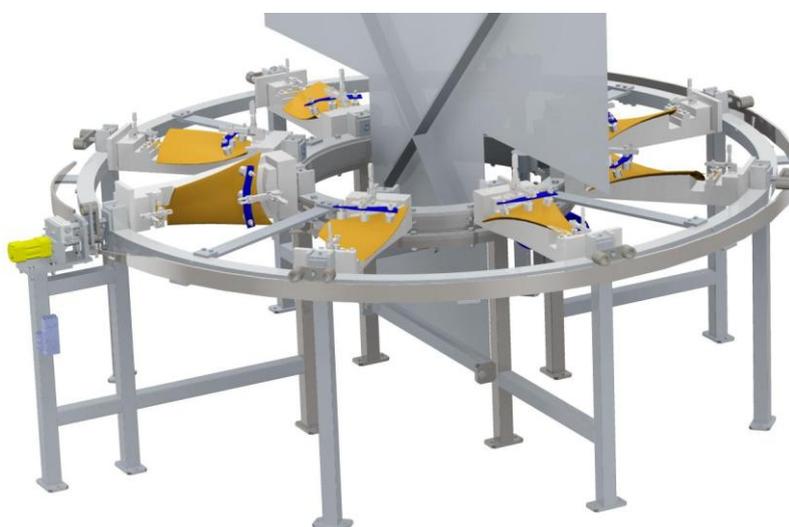
Para un funcionamiento óptimo con la mínima actuación manual por parte del operario se ha decidido incorporar también un sistema de guiado mecánico (introducido con la alternativa 3. *Mesa circular mecánica*).

Con la incorporación de dos guías en el perímetro del aro exterior, se usa el brazo de volteo acoplado al utillaje para, aprovechando el giro de la mesa, llevar el utillaje a la posición precisada en cada zona de trabajo.



**Ilustración 78. Guía de puesta en posición de soldadura**

De esta manera se diseña una rampa exterior de aproximación a la posición inicial de soldadura para reducir así el impacto contra el sistema de volteo dispuesto. Se trata de forzar al utillaje a girar desde la posición de carga hasta la primera posición de soldadura. Para asegurar que dicha posición esté perfectamente determinada (que sea siempre la misma), se hace uso de la distinción entre los tetones del brazo, explicados en el apartado 7.2.4.2, siendo uno de ellos más largo. La colocación de la guía en la posición adecuada hace que sea únicamente el saliente más largo el forzado a seguir la trayectoria. Se consigue así la determinación unívoca de la posición inicial, aproximando al utillaje a la misma. Como ya había sido explicado anteriormente, la colocación final se ejecuta mediante el brazo de volteo y el sistema de indexado.



**Ilustración 79. Guía para posición de carga y descarga**

Tras la ejecución de la soldadura completa, de nuevo aprovechando el giro de la mesa, se lleva al utillaje a una posición horizontal que permite la carga y descarga por parte del operario. Para ello se emplea un sistema equivalente de guiado externo que actúa en esta ocasión sobre los dos salientes, consiguiendo así fijar la posición horizontal del utillaje. La guía se dispone de tal manera que se asegura el contacto inicial del tetón más largo para asegurar que la posición forzada es la adecuada para la carga y descarga.

### **7.2.5. Ventajas del diseño**

El diseño planteado consigue la optimización de dos pilares fundamentales: por un lado la calidad máxima del proceso de soldadura desarrollado en la célula, y por otro la facilidad y comodidad de trabajo del operario que maneja el sistema.

La consecución del proceso idóneo de soldadura se basa en la reducción del tiempo entre la ejecución de los dos cordones, reduciéndose al máximo las deformaciones originadas por el enfriamiento.

En la mesa existente el intervalo mínimo transcurrido entre la soldadura de uno de los cordones y la ejecución del opuesto es, según lo registrado experimentalmente (reflejado en el apartado 9) de al menos 1,5 minutos (tiempo de ejecución de los otros tres cordones de los álabes de la estación). Con el diseño renovado se permite la ejecución sucesiva de ambos cordones, con un tiempo intermedio marcado únicamente por la velocidad del volteo.

El proceso se ve mejorado además por el aumento de la precisión en el posicionado del álabe, al ejecutarse el indexado del utillaje en la posición deseada, eliminándose las holguras existentes en la mesa original. Además la mesa consta de una estabilidad inherente en el plano por el asentamiento sobre dos pistas de rodadura, eliminándose todo tipo de voladizos.

El segundo aspecto básico optimizado es la comodidad de trabajo del operario, conseguida con la necesidad de programación de únicamente dos trayectorias. En la mesa actual se precisa como mínimo la introducción de 8 trayectorias diferentes (2 por cada uno de los 4 álabes de cada estación), que debido a imprecisiones en la ejecución ascienden en realidad a 16.

Esto supone que cada vez que el proceso es modificado, el operario debe introducir (considerando que actualmente se define cada trayectoria con aproximadamente 12 puntos) un total de 192 puntos. Aparte de lo tedioso del proceso, no se consigue con ello una precisión máxima en la definición de la trayectoria, lo cual genera errores en la soldadura final.

Con el nuevo diseño se requiere la programación única de dos trayectorias, con el aumento de la versatilidad y reducción de tiempos que ello supone. Considerando la introducción del mismo número de puntos, el operario podría definir cada trayectoria con 96, lo cual generaría una descripción perfecta del perfil a soldar (aunque no se hace necesario).

Adicionalmente el sistema diseñado consta inherentemente de otras múltiples ventajas, como son la reducción del número de actuadores necesarios, pasando de los 6 de la mesa actual, a 3 en la planteada. De esos 3 actuadores, dos son neumáticos y su gobierno es todo/nada, con la simplicidad de control que ello supone (en la mesa actual hay 3 motorreductores cuyos giros deben ser controlados). Con todo ello el control del sistema queda extensamente simplificado, como será detallado en el apartado correspondiente.

Por otro lado el sistema es inherentemente seguro, debido a que tan sólo existe un posible riesgo por giro de la mesa mientras el operario manipula el utillaje. Este es fácilmente evitado a través del uso de la barrera de seguridad empleada actualmente, que impide el giro en presencia del usuario.

## 7.3. Selección de actuadores

Con el diseño planteado se precisan un total de tres actuadores para conseguir la completa funcionalidad de la mesa: un motorreductor para la generación del giro del bastidor, un actuador de giro neumático para el volteo del utillaje y un cilindro de doble efecto para el proceso de indexado. Se procede a continuación al detallado de la selección de cada uno de los mencionados.

### 7.3.1. Motorreductor

Para desarrollar el giro del bastidor móvil de la mesa se realiza la transmisión de movimiento desde un engranaje a la corona de giro. Se precisa por tanto un actuador rotativo para acoplar sobre dicho mecanismo.

El diseño planteado libera al actuador de la exigencia de una extremada precisión en el movimiento, dado que esta será conseguida gracias a los sistemas de indexado ya explicados. Es por ello que el empleo de un motorreductor resulta ser la opción más adecuada por coste, disponibilidad y prestaciones.

En base a los cálculos referidos en el *Anexo I: Cálculos justificativos* en los que se evalúa el par necesario para el giro del bastidor teniendo en cuenta la resistencia de los elementos rodantes, se obtiene una potencia requerida para el motor de 0,12 kW (como el actualmente empleado para el volteo de las estaciones, permitiéndose por tanto el reciclado de la célula).

Para la selección del reductor se busca que el ciclo de trabajo de la mesa aúne productividad y seguridad. Es por ello que inicialmente se planea una velocidad de giro del bastidor equivalente a la registrada en la mesa actual disponible, en la que el giro de estaciones se ejecuta aproximadamente a 1,5 rpm.

Sin embargo, considerando la disponibilidad de un variador de frecuencia que permite un control preciso de la velocidad del motorreductor, y la mayor seguridad inherente del nuevo diseño, se decide adoptar una velocidad nominal de giro de la mesa de 3 rpm. Se evita de esta manera la limitación de una velocidad máxima demasiado baja, permitiéndose así un cierto margen de variación.

Para alcanzar dicha velocidad de 3rpm se precisa una velocidad aproximada a la salida del reductor de 29 rpm, considerando la reducción introducida mediante el conjunto corona-engranaje. La reducción necesaria es por tanto de 50.

La ubicación del motor hace que se precise un reductor de salida ortogonal. Además, considerando los cálculos detallados en el *Anexo I: Cálculos justificativos* referidos al par resistente y considerando la reducción del conjunto engranaje-corona, se requiere un par máximo a la salida del reductor de 33 Nm.

Se elige por ello un reductor de tipo SM 35 de aluminio con salida de eje hueco con una reducción de 50 que admite un par máximo de 90 Nm. El reductor será suministrado por la casa SADORNIL, para acoplamiento directo al motor mediante brida.



**Ilustración 80. Conjunto motorreductor de la gama del elegido**

### **7.3.2. Actuadores neumáticos**

Los bajos requerimientos de esfuerzos precisados en las aplicaciones de volteo e indexado, la sencillez del control, la limpieza de en el movimiento y el bajo coste han sido los factores determinantes para la elección de actuadores neumáticos en el diseño planteado. Se simplifica además la necesidad de sensores debido a la sencillez de control de los movimientos de los mismos.

#### *7.3.2.1. Actuador de giro*

Para el volteo del utillaje se elige un actuador neumático de giro que ejecuta un movimiento entre 0 y 180°, mediante un control todo/nada típico de los actuadores neumáticos.

El criterio principal considerado para la selección es el par necesario para ejecutar el giro del utillaje. Del modelo 3D se extrae que el centro de gravedad del mismo se sitúa a 42mm del eje de giro. De acuerdo a los cálculos detallados en el *Anexo I: Cálculos justificativos* referidos al par resistente de giro de la mesa, se ha determinado que el peso máximo del conjunto utillaje-álabe asciende, para el álabe de mayor tamaño soldado, a 5,82 kg. Se obtiene por tanto un par requerido para el volteo de 2,4 Nm.

Debido al reducido espacio habilitado para su instalación se establece como criterio básico el carácter compacto del componente.

En base a dichos criterios se ha elegido un actuador de la serie RCM-20 de la casa Rexroth de Bosch cuyo par de giro teórico a 8 bares es de 3 Nm, y por tanto suficiente para la consecución del mismo.



**Ilustración 81. Actuador neumático de giro RCM-20 elegido**

### 7.3.2.2. Cilindro de doble efecto

Para la tarea de indexado para fijación de la posición de soldadura, se decide utilizar un cilindro neumático de doble efecto. No existen cargas que impongan un criterio de fuerza mínima y es por ello que los criterios principales para la elección son el coste y el tamaño compacto del componente.

Se decide por tanto emplear un cilindro idéntico a los empleados en la mesa existente de la marca WAIRCOM del tipo DBUI/M8 modelo 32/60, explicados en detalle en el apartado 4.3.2.2.

Se trata de actuadores compactos y baratos que podrían además ser recuperados de la mesa actual.

## **7.4. Diseño eléctrico y electrónico**

Para el correcto funcionamiento de la célula se hace preciso un diseño eléctrico adaptado a los nuevos requerimientos y componentes. Además se trata de aprovechar al máximo el planteamiento existente, empleando equipos ya disponibles o similares a ellos. Debido a la reducción del número de actuadores utilizados en la mesa posicionadora, así como al diseño inherentemente seguro de la misma, la configuración eléctrica se hace más sencilla que la de la mesa original.

La configuración global es similar a la planteada para la célula actual, existiendo dos grandes unidades claramente diferenciadas: armario de control y máquina.

### **7.4.1. Armario de control**

De acuerdo al diseño existente, el armario de control parte de una toma trifásica que alimenta al cuadro general, protegida por el correspondiente interruptor magneto-térmico. Se hace preciso recordar que se disponen en un nivel superior, en el cuadro de distribución hacia las tres líneas salientes (cuadro robot, cuadro mesa y equipo de soldadura), las seguridades globales requeridas (magneto-térmico general y diferencial).

De dicha línea trifásica se extrae la línea monofásica que alimentará el ventilador de extracción y la fuente de alimentación, previo paso por los dispositivos de seguridad pertinentes. Debido al mantenimiento de la filosofía del diseño eléctrico, se conserva la fuente que suministra 24V y una corriente de 5A para alimentación de los diferentes componentes y generación de señales.

Para el desarrollo de la lógica de control se decide emplear igualmente el módulo PLC de OMRON CP1L SYSMAC, cuya capacidad y número de entradas y salidas se hace suficiente para el nuevo control requerido.

Debido a la propia seguridad en el funcionamiento de la mesa, se reduce la necesidad de un complejo control específico para asegurar los niveles requeridos por la norma. Es por ello que se podría prescindir del PLC de seguridad G9SP. Sin embargo, por cuestiones de disponibilidad y comodidad para la configuración, decide mantenerse dicho equipo.

Mediante dicho autómatas se ejecuta la evaluación continua del estado de los elementos principales de seguridad (barrera de detección, seta de seguridad y relé contactor para

alimentación del motor), además de su estado correcto funcionamiento. Con él se generan las señales adecuadas para control directo del contactor que posibilita la alimentación del motorreductor, así como aquellas enviadas al PLC de control para actuación en consecuencia. Se consigue con ello mantener un nivel de seguridad catalogado como SIL-3 [13], necesario para máquinas automatizadas en contacto con operarios.

La mayor simplificación del diseño con respecto al original viene dada por la reducción del número de actuadores, así como por la simplicidad de control de los mismos (siendo dos de ellos neumáticos).

En base a ello, se hace preciso únicamente un variador de frecuencia VACON 10, junto con un relé contactor que posibilita su conexión para alimentar el único motorreductor instalado en la mesa. Se eliminan por tanto dos de los variadores y contactores originales empleados para control de los tres motorreductores instalados.

Por otro lado, los actuadores neumáticos serán igualmente controlados mediante las electroválvulas AZ-521 M instaladas actualmente, cuyo gobierno será ejecutado mediante señales digitales generadas por el PLC y transmitidas mediante relés. Se hace por tanto preciso el empleo de un total de tres de los mismos para el manejo de las señales digitales principales: activación de las electroválvulas y reseteo del variador.

Consecuentemente se simplifica también el interfaz con el robot soldador, dado que según el sistema de control propuesto (explicado en detalle en el apartado 7.7), se requieren únicamente tres señales de interacción entre la mesa y el robot.

El interfaz con el operario se mantiene con una sencillez equivalente a la planteada originariamente, aunque con otras funcionalidades previstas. Se disponen así, además de la seta de seguridad pertinente, dos pulsadores (uno de reset y uno de indicación de álabe cargado) y un selector de modo.

Para la indicación del estado de la célula, se mantienen dos señales luminosas (de alimentación y de error) y se añade una nueva para muestra del modo de funcionamiento.

### **7.4.2. Máquina**

El diseño eléctrico de la unidad considerada como máquina, constituida por la mesa y el robot, se ve notablemente simplificada sobre todo en lo referente al empleo de actuadores.

Se hace así únicamente precisa la instalación del motorreductor seleccionado descrito en el apartado 7.3.1, así como las válvulas neumáticas gobernadas eléctricamente AZ-521 M.

Con el diseño planteado, podría también simplificarse el número de sensores necesarios, sin embargo, en base a la disponibilidad de los mismos, y a la búsqueda de un funcionamiento óptimo, se decide mantener el empleo de dos finales de carrera y dos sensores inductivos, además de la precisada barrera de detección de presencia para mantenimiento de la seguridad.

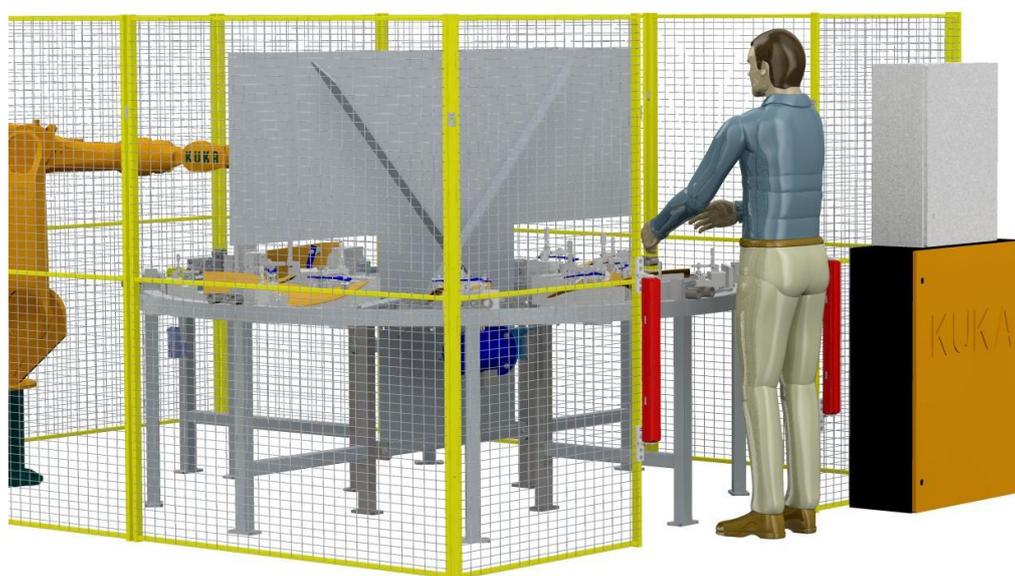
La componente sensorica se describe detalladamente en el apartado siguiente.

## 7.5. Sensores

Los sensores necesarios para la gestión de la célula son cinco, pudiendo además ser reciclados de la mesa existente: barrera de detección de presencia, sensores inductivos (2) y finales de carrera (2). A continuación se procede a la descripción y justificación de su empleo.

### 7.5.1. Barrera de detección de presencia

Para la consecución de un nivel de seguridad óptimo, se mantiene la barrera LEUZE MLD 300 de detección de presencia, que será instalada en la zona de carga y descarga de álabes. La lógica se planteará de tal manera que, estando presente una persona en dicha zona, se inhabilite por completo la actuación del motorreductor, evitándose así el giro inesperado de la mesa.



**Ilustración 82. Ubicación de barrera de detección de presencia**

La seguridad de la célula queda así totalmente cubierta, dado que tan sólo existe otro movimiento en ciclo de trabajo que no supone un potencial riesgo de lesión por quedar confinado en la zona de trabajo del robot, separada del operario.

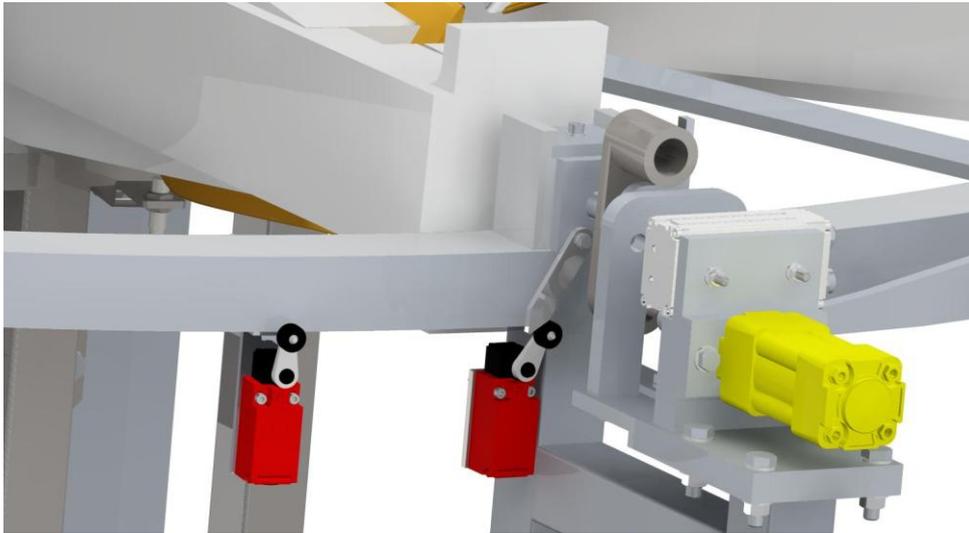
### 7.5.2. Finales de carrera

Con el funcionamiento previsto, se precisa la detección del alcance de la posición de soldadura para detención del motorreductor de giro. Se plantea para ello el uso de un sensor final de carrera OMRON D4N-4120 similar a los ya empleados en la mesa original para detección de la posición del bastidor completo de giro.

El sensor se coloca en la posición de soldadura, en que se encuentra también la unidad de volteo e indexado, para asegurar así el alcance seguro de la posición final deseada. Para la activación del sensor se dispone un indicador acoplado a cada utillaje, como ya fue introducido en el apartado 7.2.2.

En base a la disponibilidad de otro sensor de iguales características y aprovechando el sistema indicador, se decide implementar un diseño para reducción de la velocidad en la aproximación

del utillaje a la posición final, posibilitándose así un movimiento suave y evitando impactos contra el sistema de volteo. Para ello se dispone otro sensor D4N-4120 de OMRON en una posición anterior a la zona final de soldadura.



**Ilustración 83. Ubicación de los finales de carrera**

La colocación precisa de ambos sensores se determinará en base al perfil de velocidades y posiciones deseado, marcado por los tiempos de aceleración y frenado. Estos vendrán determinados a su vez por la configuración del variador de frecuencia y las inercias existentes. Los cálculos detallados de posicionado requerido de los sensores, perfiles de velocidad y posición obtenidos y configuración del dispositivo variador se precisan en el apartado 7.7.4.

### **7.5.3. Sensores inductivos**

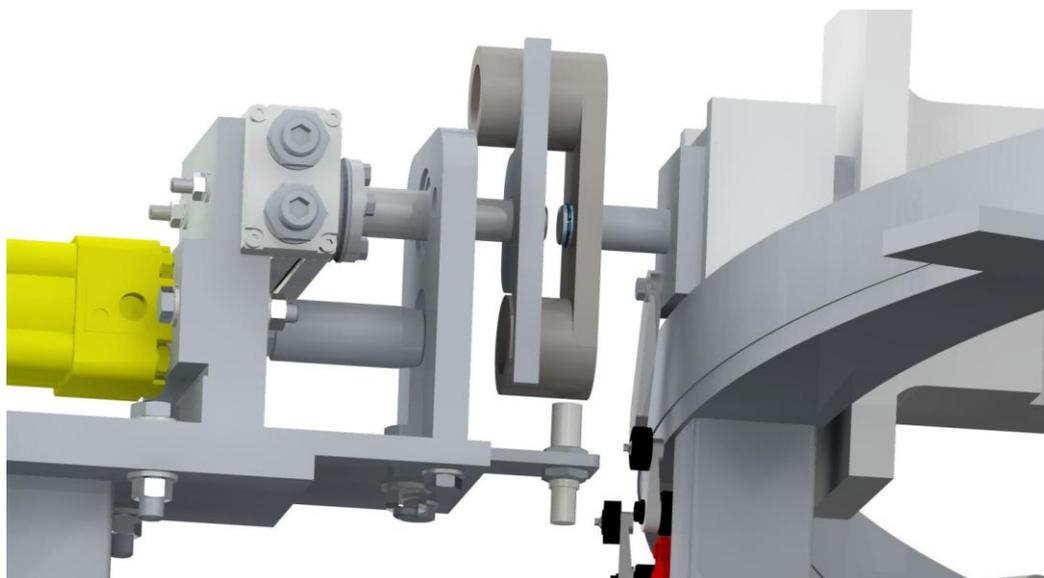
Con el sistema de sensores final de carrera dispuesto se consigue la funcionalidad de la célula según lo planteado, y por tanto no sería necesaria una mayor sensorización.

Sin embargo, en base a la posibilidad de reciclado del material disponible en la mesa original, y con miras a un funcionamiento perfecto de la célula, se plantea el uso de los dos sensores inductivos OMRON E2A (instalados para detección del giro de cada estación) para detectar errores producidos durante el ciclo de trabajo.

Uno de ellos será empleado para asegurar el alcance de la posición correcta de soldadura, mientras que el otro se encargará de verificar la existencia de un álabe en el utillaje para ser soldado. Son dos funcionalidades extra, inexistentes en la mesa actual, que permiten la eliminación de situaciones erróneas de trabajo, y por tanto posibles riesgos para el operario y/o célula.

#### *7.5.3.1. Detección de posición correcta de soldadura*

Con el diseño planteado se consigue una determinación extremadamente precisa de las posiciones finales de soldadura a través del sistema de indexado. Sin embargo, para aumentar la seguridad del proceso, se instala un sensor inductivo que, acoplado a la unidad de volteo, verificará la posición del brazo de giro del utillaje fabricado en acero S275-JR y por tanto detectable.



**Ilustración 84. Ubicación del sensor inductivo de detección de posición de soldadura**

Se consigue con ello asegurar que el álabes está en la posición adecuada, generándose una señal de permiso para el inicio de la soldadura.

Si por cualquier circunstancia (rotura del sistema de posicionado, desalineación, etc.) el utillaje no alcanzase la posición final deseada, no se permitirá el comienzo de la soldadura, evitando así posibles errores en el proceso. A través del control planteado se generará además una señal de error luminosa para notificación al operario, pudiendo así llevarse a cabo la resolución de la incidencia.

#### 7.5.3.2. *Detección de álabes*

Aprovechando la disponibilidad de otro sensor inductivo y la fabricación en acero de los álabes, se emplea el modelo E2A de OMRON para incrementar la seguridad en el desarrollo del proceso a través de la verificación de la existencia de una paleta dispuesta para ser soldada.

Pese a que el mismo equipo de soldadura dispone de una función propia (Ignition Time-Out) que genera la detención del proceso cuando la corriente no se produce en la longitud establecida de hilo, con el empleo del sensor adicional aquí detallado se consigue detectar el error incluso antes de iniciarse el proceso de soldadura, generándose así un mayor nivel de seguridad.

Además, en caso de no estar activada la función mencionada, el equipo de soldadura llevaría a cabo la alimentación de hilo hasta su impacto contra algún elemento sólido, generándose en ese momento un posible arco momentáneo, interrumpiéndose y bloqueándose a continuación el sistema.

Se decide por tanto ubicar el sensor inductivo sobre el bastidor inferior mediante una chapa que posibilite el ajuste manual hasta la posición idónea de detección, en función de la pieza a soldar. Se coloca de tal manera que es el perfil inferior del álabes (por tanto aquel que no es soldado en ese instante) el que se detecta.

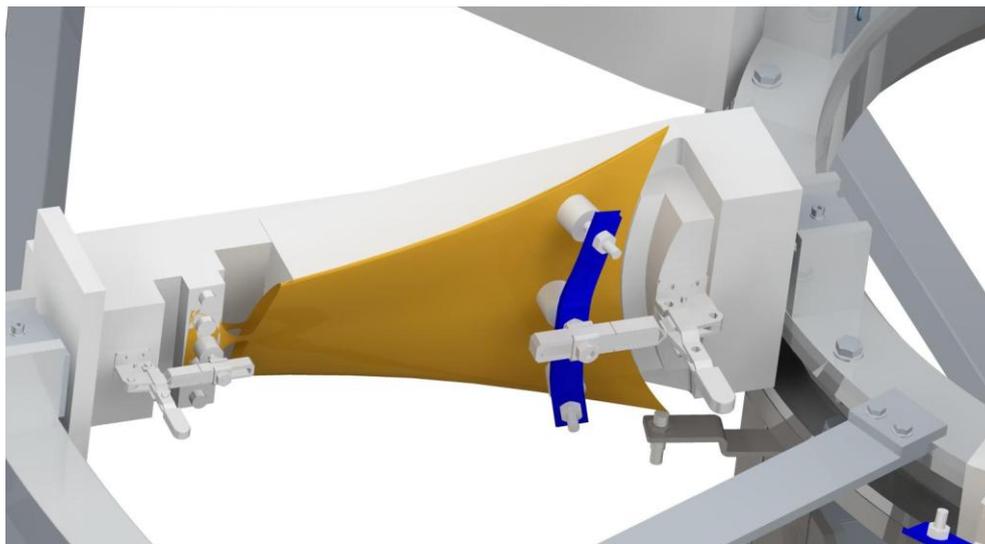
Con este sistema se verifica la existencia de álabes en disposición de ser soldado, generándose así el permiso de inicio del proceso de soldadura. En caso contrario, se lleva a cabo la detención del ciclo y la emisión de un aviso de error para que el operario pueda subsanar la situación.

Existe un riesgo para la integridad y buen funcionamiento del sensor debido a las posibles elevadas temperaturas del álabe al ser volteado tras la ejecución reciente del primer cordón de soldadura. De acuerdo con el fabricante, los sensores inductivos disponibles actualmente pueden trabajar en un ambiente de hasta 70°C (si bien es cierto que existen en el mercado modelos específicamente concebidos para trabajo a temperaturas comprendidas entre 120-170°C).

Para evaluar el nivel de dicho riesgo y validar el diseño planteado se ha ejecutado un análisis de temperaturas alcanzadas durante el ciclo de trabajo, que se presenta con detalle en el apartado 9.2. La información recabada determina que en la chapa del álabe se registran unas temperaturas de hasta 250°C en el instante inmediato tras la soldadura, 132°C pasados 10 segundos y 78°C 30 segundos después de finalizar el cordón.

Como ha sido mencionado, la medición ha sido realizada directamente sobre la chapa del álabe, por lo que se estima que la temperatura alcanzada en la ubicación del sensor no resulta crítica para el mismo. El problema se vería aún más atenuado al establecer un intervalo de espera de 10 segundos, que podría incorporarse mediante el programa de control.

El riesgo queda completamente eliminado al posicionar el sensor de manera que la detección del álabe se haga en su zona inicial en la que, por cuestiones del proceso, no se ejecuta la soldadura (una zona de aproximadamente 10mm). Las temperaturas alcanzadas en esta parte no resultan críticas, siendo el sensor elegido perfectamente válido.



**Ilustración 85. Detalle de ubicación del sensor inductivo de detección del álabe**

Esta posición de detección presenta la ventaja adicional de que la mencionada zona inicial del álabe que permanece sin soldar se encuentra siempre en la misma ubicación, independientemente del tamaño de paleta. Ello evita la necesidad de reajuste al modificar la tipología de álabe soldado.

## 7.6. Diseño neumático

Se procede a continuación a la descripción del circuito neumático diseñado para el funcionamiento de la célula.

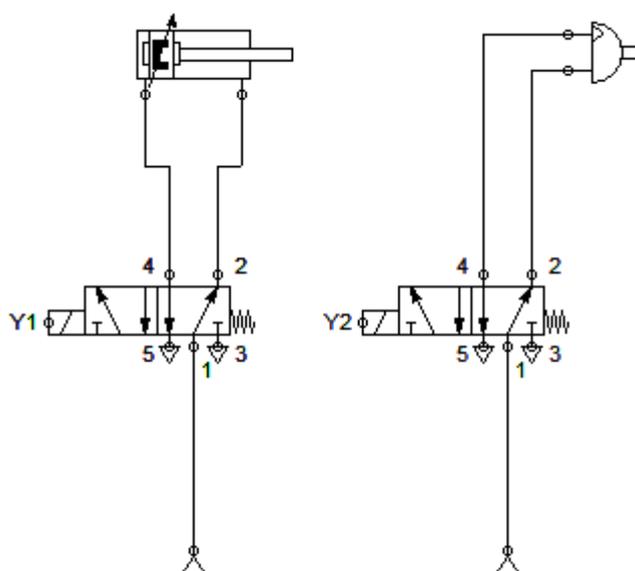
Se dispone, como fue detallado en el apartado 7.3.2, de dos actuadores neumáticos: cilindro de doble efecto para el indexado y actuador de giro de 180° para el volteo del utillaje.

Para su gobierno se aprovechan las electroválvulas de la marca AZ modelo 521 ME de tipo 5/2, es decir, 5 vías y dos posiciones. Cada válvula es pilotada por la señal asociada proveniente del PLC de control, tal como fue descrito en el apartado 7.4.

El circuito necesario para la consecución de la funcionalidad deseada (obviando la parte de acondicionamiento y suministro del aire, que es general para el taller y está ya en funcionamiento) resulta de una sencillez extrema, quedando constituido únicamente por los propios actuadores y electroválvulas mencionadas.

El aire comprimido se suministra desde la toma disponible en el puesto de trabajo a una presión comprendida entre 5 y 7 bares, siendo conectado directamente a cada electroválvula. Las salidas de cada una de ellas se conectan en un caso a las dos tomas del cilindro y en el otro a las dos del actuador de giro.

La velocidad de funcionamiento de los actuadores actualmente dispuestos en la célula demuestra que no se precisa regulación del caudal para ralentización del movimiento. Además, dado que la presión suministrada no supera en ningún caso la máxima admisible por los componentes, no se precisa tampoco limitación de la presión. Es por ello que no se hace necesario el empleo de más componentes en la instalación.

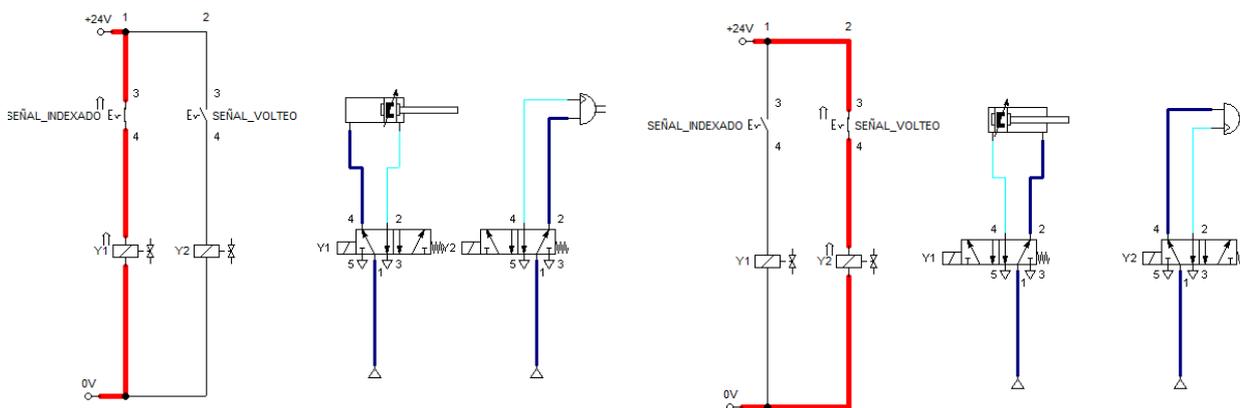


**Ilustración 86. Diseño del circuito neumático**

En caso de generarse alguna deficiencia en el funcionamiento detectada durante el ciclo de trabajo, la incorporación de componentes adicionales para la corrección de la misma (válvulas reguladoras, limitadoras de presión, escapes rápidos, etc.) resulta de extrema sencillez, lo cual refuerza la validez del empleo de un circuito neumático.

Para simular el funcionamiento del circuito mediante el software de diseño FluidSIM, se han modelado las señales eléctricas provenientes del PLC mediante dos interruptores asociados a solenoides. En el circuito real, dichas señales provienen del PLC y son conectadas directamente a las electroválvulas.

En las siguientes figuras se muestra la activación de cada uno de los actuadores al ser generada la señal pertinente.



**Ilustración 87. Simulación de funcionamiento de los actuadores neumáticos**

## 7.7. Control

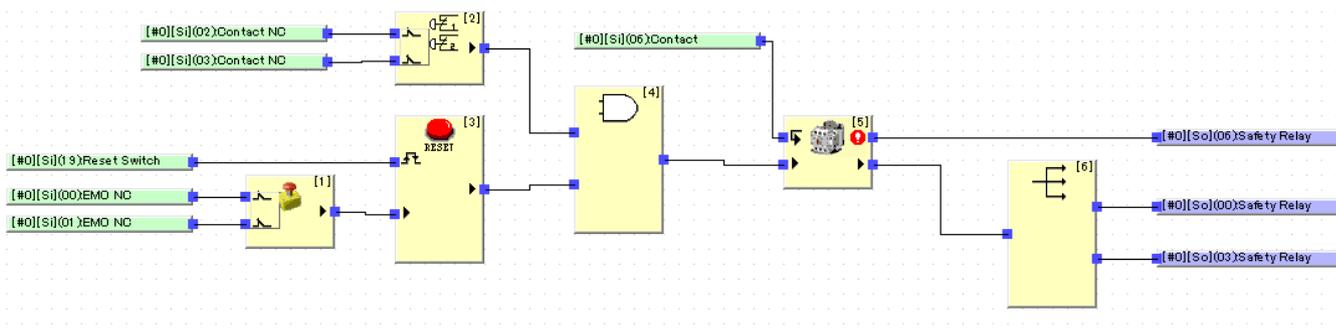
Para la implementación del funcionamiento automatizado de la célula con el nuevo diseño, se hace preciso el replanteo del programa instalado en los autómatas. Se trata de aprovechar al máximo las señales transferidas entre robot y mesa, para evitar así la modificación de la programación del robot KUKA, en la medida de lo posible.

### 7.7.1. Implementación de la seguridad

Se procede inicialmente a la definición del programa del PLC de seguridad G9SP habilitado para conseguir el nivel SIL-3 requerido para la célula. Debido al diseño inherentemente seguro de la nueva mesa posicionadora, se deberán controlar únicamente tres elementos de seguridad: seta de emergencia general, barrera de detección de presencia y el relé contactor de conexión de la alimentación del motorreductor. Es por ello que la programación requerida se simplifica notablemente.

Del autómata de seguridad se emplearán tres salidas: una para la señal de control del contactor de conexión de la alimentación del motorreductor, otra para la señal de permiso de movimiento de la mesa y por último una más para la señal de defecto del relé de seguridad, estas últimas enviadas al autómata de control.

La programación planteada se basa en bloques funcionales propios de la programación del módulo de seguridad y puertas lógicas. Para la evaluación de los elementos controlados, estos son conectados a las entradas del autómata. Para el caso de la seta de seguridad y la barrera de detección de presencia se desarrolla un control duplicado, de acuerdo a los estándares de seguridad. Se procede a continuación a la descripción de la programación planteada.



**Ilustración 88. Programa de implementación de la seguridad en G9SP**

Las entradas de la seta de emergencia duplicadas se conectan a un módulo especial de monitorización de pulsador de emergencia, que evalúa en todo momento el correcto funcionamiento de la misma. Además, cuando es pulsada, se genera la señal pertinente que genera el bloqueo del programa, siendo necesaria para su restauración la pulsación del botón de reset.

Es por ello que dicho botón se conecta también a una entrada del autómata de seguridad permitiendo así la rehabilitación de la misma por medio de un bloque de reseteo propio del programa.

Por otro lado se evalúan el estado y las señales emitidas por la barrera de presencia instalada en la célula empleándose para ello un bloque específico de entradas redundantes.

Las señales de evaluación de estado de los dos elementos de seguridad se llevan a una puerta lógica AND, cuya salida gobierna el módulo de monitorización de dispositivo externo, asociado en este caso al relé contactor de gestión de la alimentación del motorreductor. Con ello se consigue que en caso de fallo de cualquiera de los elementos (seta o barrera) o actuación sobre los mismos, se genere una señal de desactivación del relé contactor, impidiéndose así el suministro energético al motorreductor y por ende, el movimiento de la mesa.

Adicionalmente se lleva la señal del interruptor del propio relé contactor a una entrada del bloque de monitorización de dispositivo externo. Con ello se consigue cerciorar el estado idóneo del mismo, generándose una señal de fallo y desconectándolo en caso de defecto. Esta monitorización es llevada a cabo para el alcance del nivel SIL-3 de seguridad, según lo dispuesto en la normativa de máquinas [12].

Finalmente las salidas del bloque de monitorización de dispositivo externo son conectadas a las salidas del autómata de seguridad para generación de las señales pertinentes. Así, la señal que gobierna el relé de seguridad se duplica para, además de ser conectada al propio elemento (salida 0), ser enviada al PLC de control de la mesa (salida 3) de modo informativo. Al PLC de control se envía también otra señal de indicación de fallo del relé de seguridad generada por el bloque de monitorización de dispositivo externo.

Con todo ello queda definida la implementación de la seguridad requerida para la célula.

## 7.7.2. Programa de funcionalidad

La metodología planteada para la generación del programa consta de tres pasos fundamentales que a continuación se describen. Se procede primeramente a la generación de la lógica de funcionamiento en forma de diagrama de estados (StateChart), describiendo así las diferentes situaciones por las que pasa la célula, los eventos que generan las transiciones de unos estados a otros, y las acciones que deben ser desarrolladas en cada estado. Esta metodología facilita no sólo la generación y visualización de la funcionalidad global, sino también la posterior traducción al lenguaje de programación pertinente.

Una vez planteado el funcionamiento en forma de diagrama de estados, se procede a su traducción a pseudo-código, generándose así las ecuaciones matemáticas lógicas que lo describen. Se asocian así tanto los estados como las transiciones a variables booleanas que se ven afectadas por las entradas definidas, y cuyo estado gobierna las salidas en base a la lógica planteada.

Tras la obtención del pseudo-código se procede a la adaptación del mismo al lenguaje admisible por el dispositivo de control disponible. El módulo CP1L de OMRON debe ser programado mediante diagrama de contactos (lenguaje escalera). Es por ello que se recurre a la generación de variables internas booleanas, actuadas por biestables SET y RESET en función de los estados de las diferentes entradas.

Con todo ello quedará perfectamente definido el programa a cargar en el módulo PLC permitiéndose así un funcionamiento en base a lo deseado.

### 7.7.2.1. Descripción del funcionamiento

Se procede a continuación a la descripción del StateChart que define la programación planteada. Para facilitar el entendimiento del mismo, se procede inicialmente al resumen de los diferentes elementos constituyentes del diagrama, facilitando así su posterior explicación.

### Eventos y señales

Se describen a continuación los eventos que ocurren en la célula y que deben ser interpretados por el sistema de control para gestionar el estado en que se halla. En la siguiente tabla se resume el identificador del mismo, su descripción y el causante de dicho evento.

**Tabla 11. Eventos y señales del funcionamiento de la célula**

Id.	Descripción	Generado por
eSetaEmergenciaON	Seta de emergencia activada	Operario
eArranque	Inicio de trabajo (botón de álabe cargado)	Operario
ePermiso	Señal de permiso de giro por detección de persona	PLC Seguridad
eFinGiroMesa	Alcance de la posición de los puestos de trabajo	Final de carrera 1
eReset	Pulsado de botón de reset	Operario
eCargaDescarga	Selector de modo de funcionamiento	Operario

Id.	Descripción	Generado por
eAlabeCargado	Indicación de álabe cargado (botón alabe cargado)	Operario
ePosAprox	Alcanzada posición de reducción de velocidad	Final de carrera 2
ePosSold	Posición de soldadura adecuada	Sensor inductivo 1
eAlabeDet	Detección de álabe en disposición de ser soldado	Sensor inductivo 2
eOrdenVolteo	Señal de orden de volteo de utillaje (fin cordón 1)	Robot
eOrdenGiroMesa	Señal de orden de giro de mesa (fin soldadura )	Robot
eFalloMotor	Señal de fallo del motor	Variador de frec.

### **Acciones**

A continuación se muestran las diferentes acciones que deben ser desarrolladas en la célula, quedando así asociadas a señales de salida del PLC que gobernarán los diferentes actuadores. Se describe por tanto su identificador, su descripción y el elemento que gobiernan.

**Tabla 12. Acciones del diagrama de estados**

Id.	Descripción	Actúa sobre
aGiraMesa	Genera el giro de la mesa	Variador de frecuencia
aVel	Define la velocidad de giro	Variador de frecuencia
aIndexar	Genera extensión del cilindro de indexado	Electroválvula 1
aVoltear	Genera el giro del actuador neumático	Electroválvula 2
aSoldar	Genera la orden de soldadura para el robot	Robot
aLuzF	Enciende la luz indicativa de funcionamiento	Bombilla verde
aLuzError	Enciende la luz indicativa de error	Bombilla roja
aParpadeo	Genera parpadeo de la luz de funcionamiento	Bombilla verde
aParar	Detiene todos los movimientos de la mesa	Todos
aResetMotor	Señal de restauración	Variador de frecuencia

### **Estados e históricos**

Finalmente se procede a la descripción de los diferentes estados planteados para la programación, especificándose su identificador y la descripción del mismo. Se agrupan además de acuerdo a los super-estados y sub-estados planteados para facilitar la comprensión. Adicionalmente se explican las variables de históricos que permiten el guardado del estado último activo para recuperación del mismo en caso de restauración.

Tabla 13. Estados del diagrama StateChart

Id.	Descripción
X_INICIAL	Estado inicial de arranque
X_ARMADO	Super-estado de rearme inicial para poner la mesa en posición de trabajo definida
X_REPOSO	Estado con la mesa en posición de reposo alcanzada
X_RESTAURAR	Estado de giro de la mesa hasta alcanzar la posición de reposo
X_CARGA_DESCARGA	Super-estado para ciclo de carga y descarga (sin soldadura)
X_ESPERA_CARGA_CD	Estado de espera hasta carga completa de álabe
X_GIRO_MESA_CD	Super-estado para giro de la mesa un puesto
X_GIRO_INICIAL_CD	Estado de giro de la mesa a velocidad máxima
X_APROXIMADO_CD	Estado de aproximado de la mesa a posición final a velocidad lenta
X_CICLO_NORMAL	Super-estado de ciclo normal de trabajo (con soldadura)
X_ESPERA_CARGA_CN	Estado de espera hasta carga completa de álabe
X_GIRO_MESA_CN	Super-estado para giro de la mesa un puesto
X_GIRO_INICIAL_CN	Estado de giro de la mesa a velocidad máxima
X_APROXIMADO_CN	Estado de aproximado de la mesa a posición final a velocidad lenta
X_SOLDADURA_1	Estado de proceso de soldadura del cordón inicial
X_VOLTEO	Estado de girado del utillaje para disponer el segundo cordón de soldadura
X_SOLDADURA_2	Estado de proceso de soldadura del segundo cordón
X_ERROR	Estado de error por fallo de motor o posicionado
X_PARADA_EMERGENCIA	Estado de parada de emergencia de la célula

Tabla 14. Estados de historia del StateChart

Id.	Descripción
H_GIRO_INICIAL_CD	Guardado del estado anterior de giro inicial de mesa
H_APROXIMAR_CD	Guardado de estado de aproximación
H_GIRO_INICIAL_CN	Guardado del estado anterior de giro inicial de mesa
H_APROXIMAR_CN	Guardado de estado de aproximación

### **Funcionamiento**

Conocidos todos los elementos involucrados en el diagrama, se procede a continuación a la descripción precisa del mismo, que para una mejor visualización, queda dispuesto en el *Anexo II: Diagramas* con una escala apropiada.

La programación global se basa en seis estados principales:

- **Inicial:** alcanzado en el arranque y tras reseteo, con el objeto de detener todos los actuadores
- **Parada de emergencia:** tras pulsado de la seta de emergencia, para obligar a la restauración completa del sistema
- **Armado:** en que se coloca la mesa de forma alineada con el puesto de trabajo y de soldadura
- **Carga/descarga:** para posibilitar el comienzo y fin del trabajo moviendo la mesa sin que se desarrolle la soldadura
- **Ciclo normal:** que define el funcionamiento automatizado de soldadura
- **Error:** a diferencia de la parada de emergencia, posibilita la restauración del funcionamiento sin necesidad de apagado de la célula

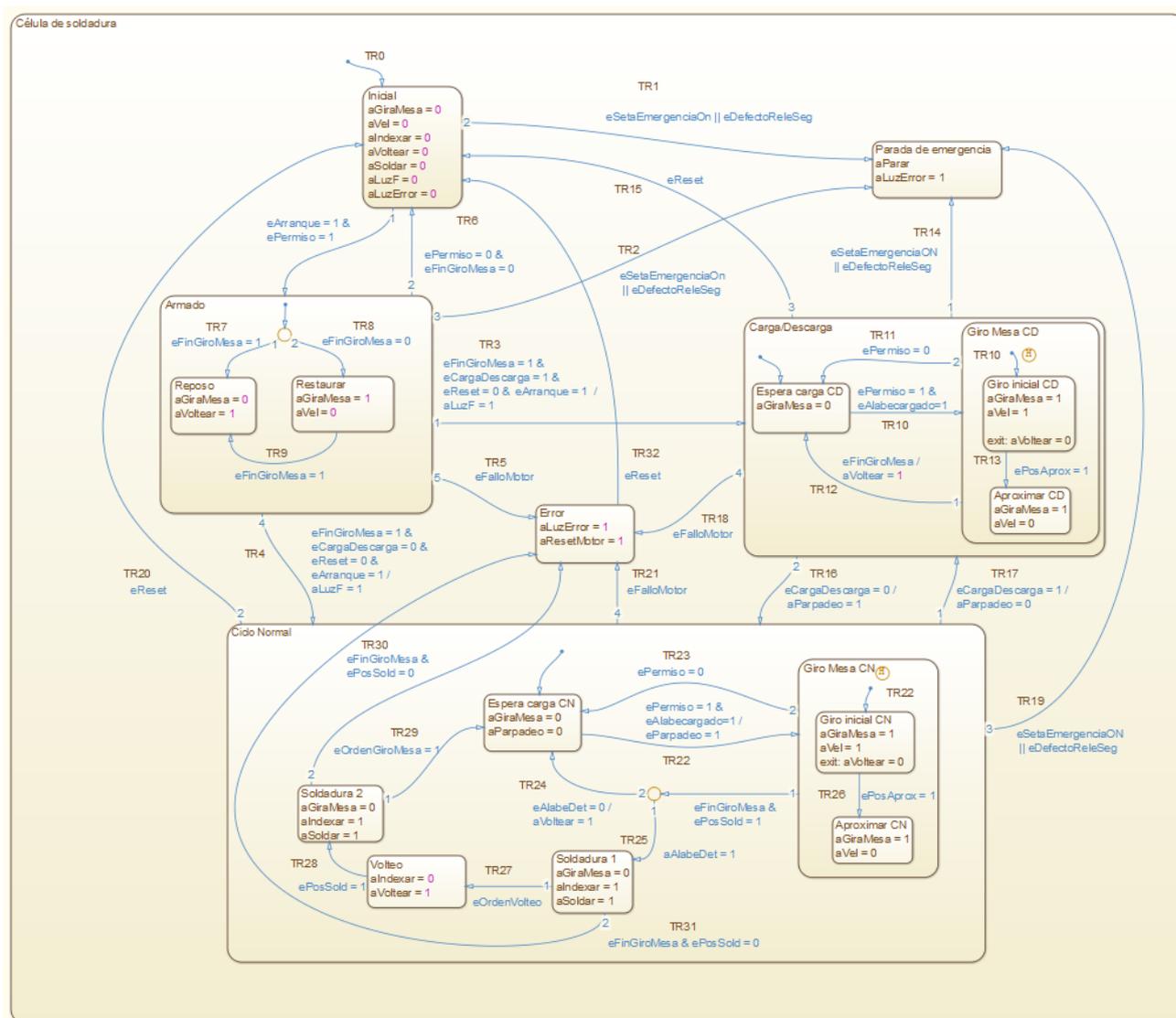
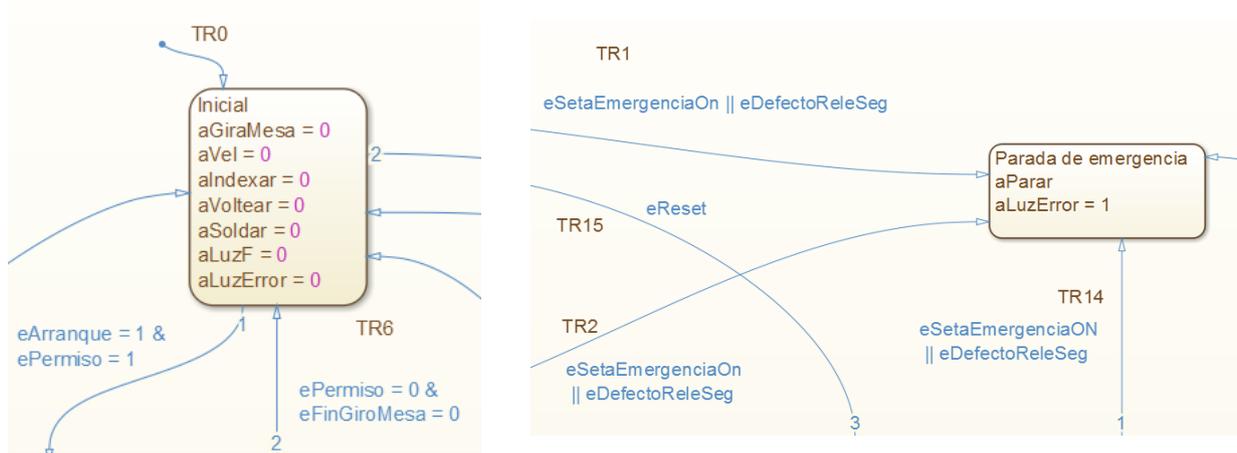


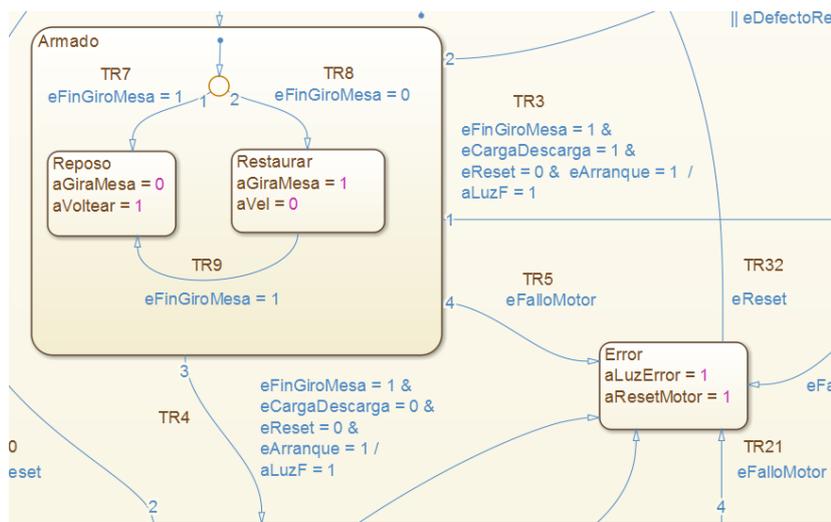
Ilustración 89. Diagrama de estados global

Al arrancar o tras la pulsación en cualquier momento del botón de *RESET* se pasa al estado “Inicial”, donde se detienen los tres actuadores y se apagan las luces indicativas. Existe un estado de “Parada de emergencia” al que se llega desde cualquiera de los otros estados al ser pulsada la seta habilitada para tal efecto. En él se detienen todos los actuadores por seguridad y además, es un estado final del que para salir se ha de apagar la célula.



**Ilustración 90. Estado inicial (izqda.) y de parada de emergencia (dcha.)**

Se disponen tres superestados de funcionamiento habitual, como son el de “Armado”, el de “Carga y Descarga” y el de “Ciclo Normal”. En todos ellos existe la necesidad de giro de la mesa, y por tanto de actuación del motorreductor instalado. En el caso de que durante cualquiera de ellos se generase un fallo en el actuador eléctrico, la señal asociada a dicho fallo procedente del variador de frecuencia, genera la transición al estado “Error”, donde se enciende una luz indicativa, y se genera una señal de restauración para el motor. Se detienen además todas las posibles acciones de la célula. Una vez restaurado el fallo, se puede retornar al estado “Inicial” mediante la pulsación del botón de *RESET*, quedando la célula nuevamente habilitada para el trabajo.



**Ilustración 91. Superestado de "Armado" y de "Error" por fallo de motor**

En un funcionamiento sin fallos, del estado “Inicial” se evoluciona únicamente al estado de “Armado” tras la pulsación del botón de arranque (que se hace a través del pulsador de *ÁLABE CARGADO*) y no habiendo operario en la zona de carga. Este estado se dispone para asegurar

que la mesa está en una posición tal, que el utillaje está colocado en el puesto de soldadura y, consecuentemente, en el de carga y descarga. Se persigue con ello evitar que la mesa arranque su funcionamiento en una posición intermedia indeterminada, pudiendo generar fallos o choques. Para conseguir el objetivo buscado se ejecuta al entrar una identificación de la posición de la mesa mediante la evaluación del estado del sensor final de carrera que detecta la posición del utillaje en la zona de actuación. En caso de no estar activo (indicativo de que la mesa está en una posición intermedia indeterminada) se pasa al subestado “Restaurar” en que se ejecuta inicialmente el giro del brazo de volteo para ponerlo en posición de recepción de utillaje, y a continuación se genera el giro a la velocidad lenta de aproximación de la mesa. Este giro se produce hasta alcanzar la posición final adecuada, en que se activa el sensor final de carrera generando la transición hacia el estado de “Reposo”, en que se detiene el giro, y se voltea el brazo para permitir el giro siguiente.

En el caso de que la mesa esté en posición adecuada en el arranque, se pasa directamente al estado de reposo, en el que se mantiene la mesa detenida y se voltea el utillaje para permitir su salida. Para una situación en que la mesa se encuentre en movimiento para alcanzar la posición de reposo, y se detecte una presencia en la zona de carga y descarga, se genera una transición al estado “INICIAL”, deteniendo el giro de la misma.

En la situación hipotética de que existiese un álabe en el utillaje dispuesto para ser soldado al arrancar el programa, se genera igualmente el ciclo inicial descrito, generando el girado de la mesa inicial, quedando dicho álabe sin soldar. Al no disponer de un método para identificar si el álabe colocado inicialmente está ya soldado o no, se decide adoptar esta medida de seguridad. Ante tal incertidumbre, es preferible que el álabe de una vuelta completa para ser soldado (no se descargaría llegado su turno en el puesto de carga), frente a que un segundo proceso de soldadura fuese ejecutado sobre el mismo, haciendo al álabe inservible.

Del estado de “Armado” se puede pasar o bien al ciclo de “Carga/Descarga” o al “Ciclo Normal”, dependiendo de la posición del selector de modo. Se pasa al estado de “Carga/descarga” cuando se cumplen las condiciones siguientes: la mesa está en posición alineada, el selector de modo en “Carga/Descarga”, el botón de *RESET* desactivado (al ser NC tendrá un nivel alto) y detectada la pulsación de *ARRANQUE* (que se hace a través del pulsador de *ÁLABE CARGADO*). Se incluye la condición de la mesa alineada para evitar que un pulso prolongado desde el estado inicial genere la transición directa a cualquier estado de funcionamiento sin pasar por el de “Armado”.

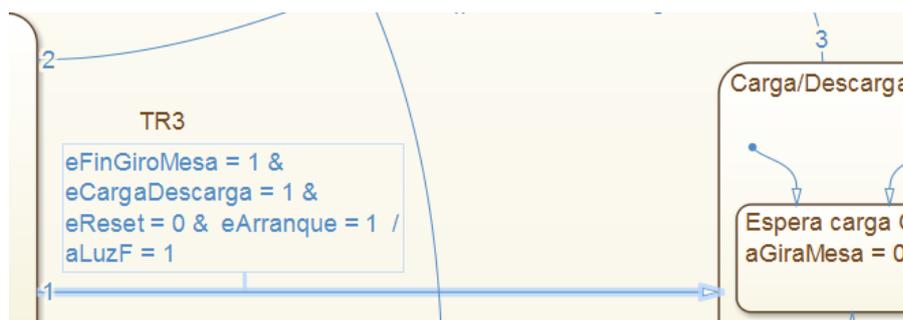
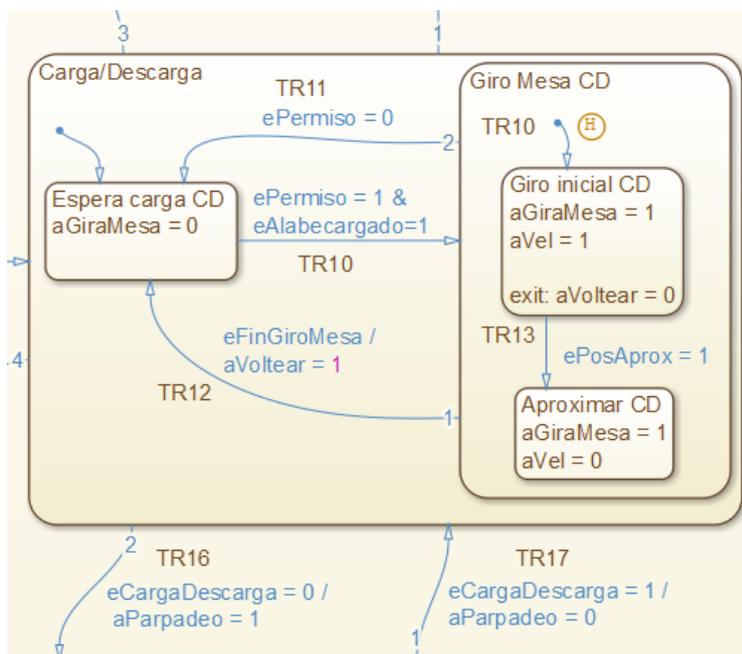


Ilustración 92. Condición de transición al estado de “Carga/Descarga”

En caso de estar seleccionado el modo de operación en ciclo normal, y cumpliéndose las mismas condiciones de *RESET* no activado y pulsación de *ARRANQUE*, se pasa al estado de “Ciclo Normal”. Esta opción se piensa para situaciones en que se detenga el funcionamiento normal de la mesa, con ella completamente cargada y tras ello se desee retornar al ciclo de funcionamiento “Normal”, sin necesidad de carga previa de álabes.

Se dispone de una bombilla para indicación del modo de funcionamiento de tal manera que con el cumplimiento de las condiciones de transición a cada uno de los superestados principales, se enciende la bombilla inicialmente de forma fija tanto para el modo de Carga/Descarga como para el ciclo normal. Será la ejecución de las operaciones de girado, soldado y volteo, las que se señalicen con la intermitencia del indicador.



**Ilustración 93. Estado de "Carga/Descarga" y transiciones al "Ciclo Normal"**

En el ciclo de carga y descarga se comienza en un subestado “Espera Carga”, en que se mantiene la mesa parada, esperando a que el operario cargue un álabe en el utillaje al que tiene acceso. Tras ello, cuando el operario pulsa el botón de *ALABE CARGADO* estando el detector de presencia a 0 (sin personas en la zona de carga), se pasa al estado de “Giro de Mesa CD”. Este estado consta a su vez de dos subestados: se comienza por defecto en “Giro inicial” donde la mesa gira a una velocidad rápida de 2,3 rpm. A la salida de este estado por activación del sensor de posición de aproximación, se lleva al volteador a su posición de reposo para recibir a un nuevo utillaje. Con ello se asegura que el giro del brazo volteador se hace después de que el utillaje alojado se haya alejado, y antes de que el siguiente haya llegado.

Ya en el estado de “Aproximar CD” la velocidad de giro de la mesa es reducida a 0,6 rpm para evitar un posible impacto debido a las inercias del movimiento. Alcanzada la posición final, se retorna al estado de “Espera carga”, generándose además el giro del volteador para permitir la salida del utillaje en el siguiente giro. Se habilita así la carga de un nuevo álabe sin ejecución de soldadura. Cabe destacar que el estado global de “Giro Mesa” se establece para habilitar la detención de cualquier giro de la misma (ya sea a velocidad inicial o de aproximación) cuando el detector de presencia se activa, retornando en tal caso al estado al “Inicial” de paro. Además, para el retorno correcto a la funcionalidad tras desaparición de la presencia en la zona de carga,

se habilita una función de histórico que permite retomar la tarea que estaba siendo desarrollada: o bien girado inicial, o bien girado de aproximación.

Con este ciclo repetitivo se posibilita el proceso de carga inicial, en que la mesa está vacía y deben cargarse como mínimo 4 álabes antes de que uno de ellos alcance la posición del robot para comenzar el proceso de soldadura. Lo mismo sucede en la finalización del trabajo, en que tras soldar el último álabe, se debe girar la mesa cinco veces sin soldar para extraer todas las piezas fabricadas.

Con 4 álabes cargados en la mesa, puede pasarse al ciclo normal de trabajo, dado que con el giro de la misma, un álabe será ya situado en la zona de actuación del robot, pudiéndose ejecutar la soldadura. Para ello, debe cumplirse la condición de selección del modo “Ciclo Normal” mediante el selector. Ello genera el cumplimiento de la condición para pasar al superestado “Ciclo Normal”. Este se inicia por seguridad con un estado de “Espera Carga” equivalente al ya explicado en el superestado de “Carga/Descarga”, en el que para su indicación, se mantiene la luz de funcionamiento fija.

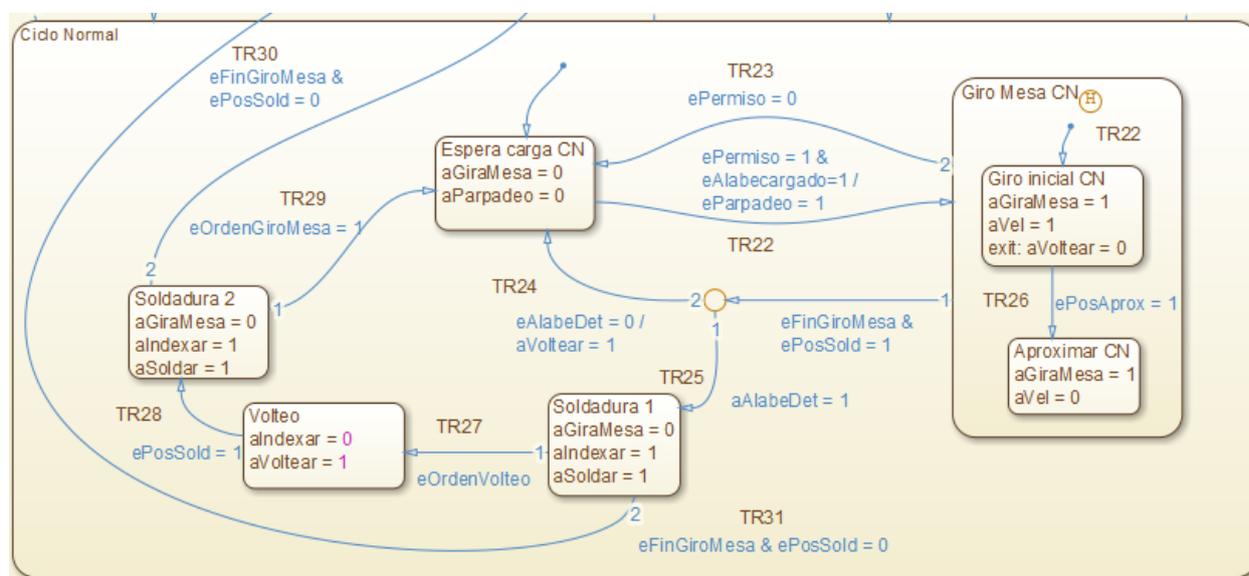


Ilustración 94. Estado de "Ciclo Normal"

Con la actuación del pulsador de *ÁLABE CARGADO* y sin haber nadie en la zona de carga se pasa al estado de “Giro Mesa” igualmente programado que para el proceso anteriormente explicado. Se activa además la intermitencia de la bombilla para indicación de ciclo en ejecución. Tras alcanzar la posición de soldadura adecuada, activándose las señales tanto del final de carrera, como del inductivo de posición adecuada del utillaje, se pasa al estado de “Soldadura 1”. En él se ejecuta la detención del giro de la mesa, se activa el cilindro de indexado, y se emite la orden para el robot de ejecución del cordón de soldadura inicial.

En el caso de que no se activase la señal de posición de soldadura alcanzada, se pasa al estado de “Error” en el que se enciende la bombilla de error y se restaura el motorreductor. Se posibilita así la restauración del error generado, primando la seguridad de la operación.

Por otro lado, en caso de que el sensor inductivo dispuesto para ello no detectase álabe en el utillaje, y por tanto no pudiese ejecutar la tarea de soldadura, se emite una señal (eNoAlabe) que genera la transición al estado de “Espera Carga”, generándose además la orden de volteo del

utillaje. Con ello se dispondría la mesa para avanzar un puesto y proceder con la siguiente soldadura, sin necesidad de detención del ciclo completo.

En caso de que la soldadura del primer cordón se desarrolle sin fallos y de forma adecuada, el robot emite una señal de fin de soldadura, que genera el paso al estado de “Volteo”, en que se procede a la extracción del cilindro de indexado, y tras ello al movimiento del actuador de giro neumático, llevándose a cabo el girado del álabe.

Si la segunda posición es correctamente alcanzada se genera de nuevo una señal por parte del sensor inductivo que así lo confirma, permitiendo la transición al estado de “Soldadura 2”, en que de nuevo se mantiene el giro de la mesa detenido, se ejecuta la extensión del cilindro de indexado y se emite la orden de soldadura secundaria para el robot. Bajo las mismas condiciones de no detección de la posición de soldadura apropiada o de álabe en el utillaje, se genera de la transición al estado de “Error” o “Espera Carga” respectivamente, de igual manera a lo ya explicado anteriormente.

Finalizado el proceso de soldadura del segundo cordón el robot emite una señal de finalización hacia la mesa, cuya lógica pasa al estado inicial de “Espera Carga”, en que se mantiene la mesa completamente detenida, siendo indicado de nuevo con la luz fija.

En base al estudio del ciclo de trabajo reflejado en el apartado 9 se aprecia que, por norma general, el tiempo de carga y descarga de álabes es netamente inferior al de soldadura completa del álabe, por lo que podría generarse un retorno al ciclo de giro de la mesa de forma automática.

Sin embargo, se decide por seguridad retornar al estado inicial de “Espera Carga”, habilitándose así el giro de la mesa única y exclusivamente con la pulsación del operario del botón de *ÁLABE CARGADO* y no habiendo nadie en la zona de carga y descarga.

Con ello se prevén posibles situaciones excepcionales en que la carga se ralentice, precisándose un tiempo superior al que el robot emplea en completar la soldadura, evitándose así el giro de la mesa sin deseo expreso del usuario. Este es informado del permiso de avance a una nueva posición de soldadura a través de la señal luminosa fija. El parpadeo de dicha bombilla es indicador de que la soldadura está en proceso, y aún no puede procederse al avance de un nuevo álabe.

Del superestado del “Ciclo Normal” de trabajo se saldría por selección del modo de “Carga/Descarga”, retornándose a dicho superestado ya explicado, para proceder al vaciado de la mesa.

Queda así definida la lógica principal de control del sistema que permite un trabajo continuo de soldadura de álabes, en el que prima la comodidad y seguridad del operario. Se aprecia una gran simplicidad de control, en base a los pocos estados susceptibles de la mesa derivados de la simplicidad del diseño.

#### 7.7.2.2. *Generación de pseudo-código*

Como había sido explicado, partiendo del diagrama de estados descrito, se procede a la generación del pseudo-código (referido en el *Anexo III: Programación PLC*) a través de ecuaciones lógicas. Para ello se recurre al método explicado en el *Resumen sobre Grafcet*[22].

Para ello se definen primeramente las transiciones planteadas en el diagrama de estados, quedando definidas mediante ecuaciones lógicas básicas mediante operadores AND y OR, que relacionan las condiciones de evolución a otro estado en base a los eventos detectados.

Tras la descripción de un total de 32 transiciones diferentes, se procede a la definición de la activación y desactivación de estados. Para ello se asocian a cada estado las acciones de biestables SET y RESET. Su funcionamiento queda gobernado por las transiciones asociadas a la activación y desactivación de cada estado. Igualmente a través de biestables se procede a la descripción del manejo de las señales históricas.

Con todo ello definido, se procede en último lugar, a la definición de las acciones (asociadas a señales de salida) y su activación o desactivación. Esta vendrá determinada por la activación de los estados a que se asocian, o por determinadas transiciones. Para su definición se recurre a cláusulas lógicas AND y OR.

#### Ilustración 95. Ejemplo de pseudo-código generado

```
// EVALUACION DE TRANSICIONES
TR2:= X_ARMADO AND (eSetaEmergenciaOn OR eDefectoReleSeg)
TR3:= X_ARMADO AND eFinGiroMesa AND eCargaDescarga AND (NOT eReset) AND eArranque

//ACTIVACIÓN Y DESACTIVACIÓN DE ESTADOS
S(X_INICIAL) := TR0 OR TR6 OR TR15 OR TR20 OR TR32
R(X_INICIAL) := TR1 OR TR7 OR TR8
```

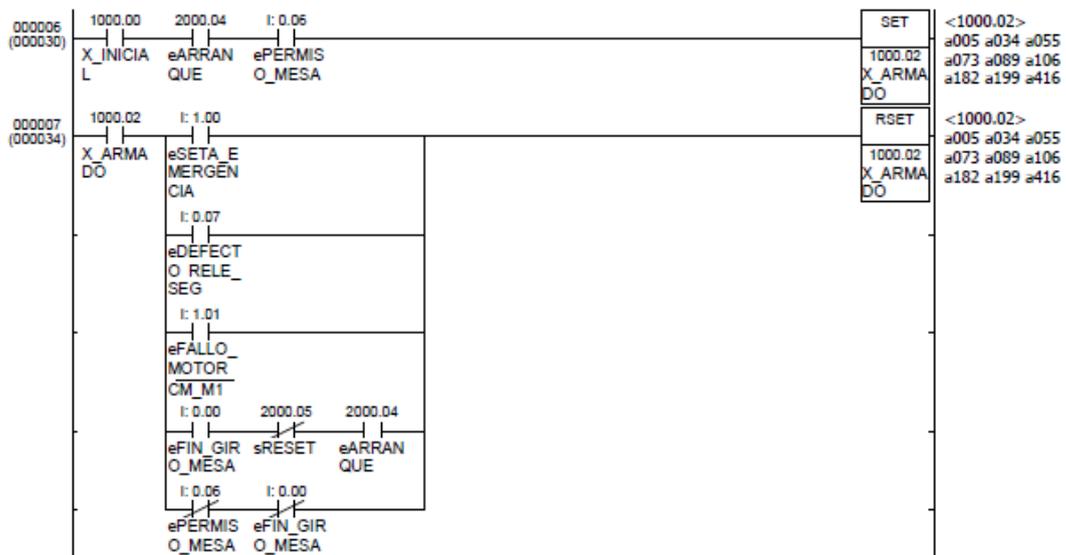
La gestión de las acciones se define mediante señales de activación simple, (se encienden al cumplirse las condiciones asociadas, pero se apagan cuando no se cumplen), excepto para el caso de la acción de volteo, para la cual se precisa el empleo de un dispositivo biestable. Esto es necesario al quedar las posiciones del actuador definidas por el estado activo o inactivo, y por tanto se precisa una conservación del estado pese a que se incumplan algunas condiciones. Por tanto sólo se definirá el movimiento contrario cuando se cumplan otras determinadas condiciones específicas.

#### 7.7.2.3. Traducción a lenguaje del CPIL de OMRON

El paso final para completar la programación se lleva a cabo mediante la traducción del pseudo-código generado al lenguaje aceptado por el PLC disponible: diagrama de contactos.

Para ello se asocian las señales de entrada a contactos, los estados a variables internas y las acciones a señales de salida. El programa se plantea por tanto en base a la activación y desactivación de las señales de estados mediante biestables SET y RESET disponibles en el programa.

La implementación de las transiciones asociadas a dichas activaciones o desactivaciones se genera mediante la lógica de contactos equivalente, colocándolos en serie para la generación de condiciones AND y en paralelo para la de OR.



**Ilustración 96. Ejemplo de traducción al lenguaje de contactos del CP1L de OMRON**

Finalmente se gobiernan las salidas a través de las condiciones y variables internas pertinentes para lograr la funcionalidad adecuada.

Adicionalmente se recurre al empleo de temporizadores para la generación del parpadeo de la luz de funcionamiento.

Con todo ello queda implementado el programa para el PLC (desarrollado en el *Anexo III: Programación PLC*) que posibilita el control y funcionamiento automatizado de la célula en base a lo deseado.

### 7.7.3. Descripción de señales

Se describen a continuación las señales principales manejadas en el sistema para el correcto funcionamiento conjunto de robot y mesa posicionadora.

**Tabla 15. Señales de funcionamiento de la célula**

Id.	Descripción	De/Hacia	Valores	Interpretación
OGM	Orden Giro Mesa	Robot-mesa	0	Robot desea mesa parada
			1	Robot ordena giro de mesa
OVU	Orden Volteo Utillaje	Robot-mesa	0	Robot quiere utillaje detenido
			1	Robot ordena volteo de utillaje
OIS	Orden de inicio de soldadura	Mesa-Robot	0	Soldadura no demandada
			1	Orden de ejecución de soldadura
PM	Permiso de giro	PLC Seg – PLC Control	0	Permiso de giro de mesa denegado
			1	Permiso de giro de mesa concedido
DFR	Defecto relé de seguridad	PLC Seg- PLC Control	0	Relé de seguridad sin fallo
			1	Fallo detectado en relé de seguridad
EV1	Electroválvula 1	PLC Control Electroválvula Cilindro index	0	Cilindro de indexado retraído
			1	Indexado por extensión de cilindro

Id.	Descripción	De/Hacia	Valores	Interpretación
EV2	Electroválvula 2	PLC Control-	0	Actuador de giro en posición de recepción
		Electroválvula Actuador giro	1	Giro del actuador a posición de salida
R_M1	Orden giro motor	PLC Control-	0	Motorreductor parado
		Motorreductor	1	Giro de motorreductor a derechas
VEL_CTE	Velocidad constante	PLC Control-	0	Velocidad constante 1 (aproximación)
		Variador	1	Velocidad constante 2 (rápido)
R_St1	Reset motorreductor	PLC Control-	0	Reset de motorreductor deshabilitado
		Motorreductor	1	Rearme de motorreductor tras fallo
CM_M1	Fallo motorred.	Motorreductor	0	Funcionamiento correcto motorreductor
		PLC Control	1	Fallo en funcionamiento de motorreductor

### Particularidades

Con la puesta a 0 del bit de selección de la velocidad del motor se establece la velocidad lenta de giro, mientras que es su nivel activo alto el que define la velocidad máxima. Se busca con ello un diseño seguro en que un fallo en la señal de selección genere el establecimiento de la velocidad lenta de giro.

#### 7.7.4. Selección de velocidades de giro

Según el control dispuesto, se precisan dos velocidades diferentes de actuación del motorreductor para conseguir las deseadas de giro y aproximación. Para ello es necesario definir cuatro parámetros en el variador de frecuencia VACON 10 empleado.

Con los parámetros P3.4 (velocidad constante 0) y P3.5 (velocidad constante 1) se definen las frecuencias que definen la velocidad de salida del motor. Por otro lado, los parámetros P4.2 y P4.3 definen respectivamente el tiempo de aceleración y de deceleración desde 0 hasta 50 Hz y viceversa.

Para la selección óptima de los parámetros a definir en el variador, se ha procedido a la evaluación de los perfiles de velocidades y ángulo de giro con respecto al tiempo en función del valor dado a dichos parámetros.

Se han aplicado para ello las ecuaciones cinemáticas correspondientes al movimiento circular uniformemente acelerado (para el arranque, frenado y detención) y movimiento circular uniforme (para el giro a velocidades constantes). Con dichas leyes y en base al ángulo que se precisa girar ( $45^\circ$ ) se puede evaluar la influencia de los parámetros elegidos en aspectos como: los perfiles de velocidad y posición, la duración del ciclo, o también la determinación de la ubicación exacta precisada para los finales de carrera.

Para su constatación se han elaborado gráficos de posición-tiempo y velocidad-tiempo, que a continuación se mostrarán para los parámetros elegidos.

Tras la evaluación de diferentes alternativas, y buscando un funcionamiento suficientemente seguro, se decide establecer como velocidades de giro constante mínima y máxima 0,6 y 2,3 rpm respectivamente.

Teniendo en consideración las reducciones introducidas por los engranajes y la reductora elegida, se precisa la configuración del variador con frecuencias de velocidad constante de 10 y 35 Hz respectivamente. Por otro lado se fijan unos tiempos de aceleración y deceleración de 2 segundos, considerados adecuados para el desarrollo de un movimiento suave, protegiendo así al operario y la duración de los componentes.

Con esta configuración se precisa para el traslado del álabe en espera a la posición de soldadura (giro de 45°) un tiempo total de 5 segundos. A continuación se muestra el gráfico ángulo girado – tiempo y el perfil de velocidad alcanzados con esta configuración.

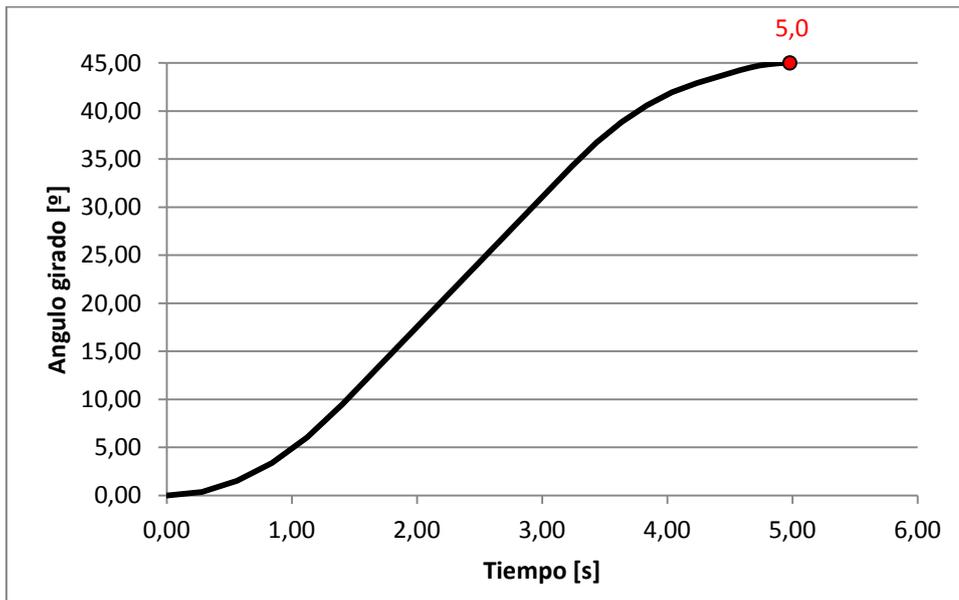


Gráfico 1. Perfil ángulo girado - tiempo para la configuración elegida

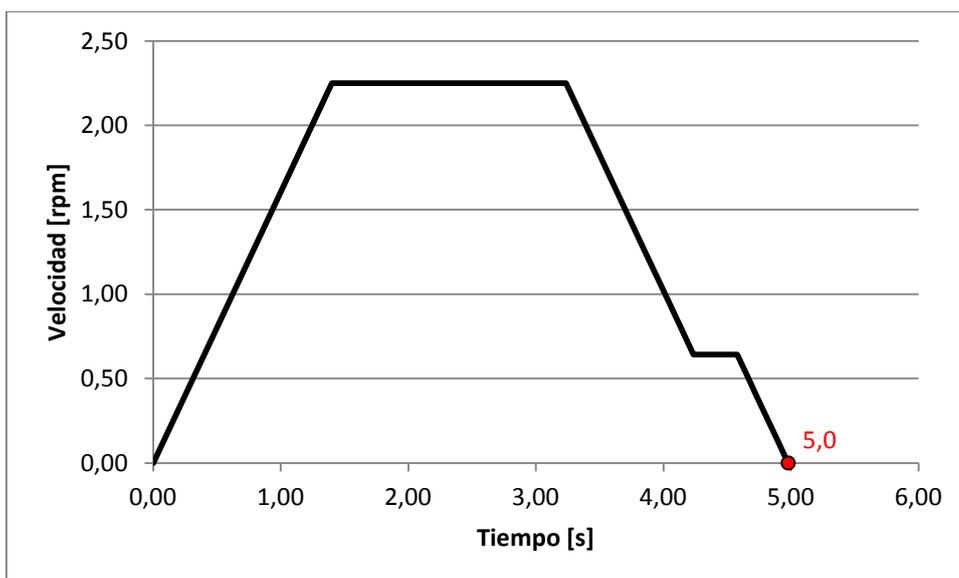


Gráfico 2. Perfil de velocidad para la configuración elegida

Del perfil del ángulo girado se aprecia que con la configuración adoptada se describe un movimiento suave, sin cambios bruscos y con un frenado adecuado para conseguir una aproximación lenta al punto final de soldadura. Además el tiempo de ejecución de 5 segundos es suficientemente ajustado como para conseguir una productividad elevada.

Del perfil de velocidades se aprecia un movimiento a velocidad máxima de 3 segundos, y uno a velocidad de aproximación reducida de medio segundo. Se extrae además que tanto las aceleraciones como los movimientos a velocidad constante son suficientemente adecuados tanto para la conservación de la seguridad del operario como para la duración de los componentes móviles de la mesa, evitándose desgastes excesivos por movimientos bruscos o impactos.

#### *7.7.4.1. Ubicación precisada para los finales de carrera*

Otro de los objetivos fundamentales del análisis detallado para la selección de la configuración de las velocidades es la determinación precisa de la ubicación de los finales de carrera, de manera que se eviten choques o funcionamientos inadecuados.

En base a lo calculado, se ha estimado la necesidad de colocar el final de carrera de detección de la posición final de soldadura en una posición tangencial adelantada aproximadamente 4° con respecto al lugar de detención deseado.

Se tienen así en cuenta las inercias y tiempos de frenado requeridos para que, tras la activación del sensor, la mesa se detenga en la posición precisa de soldadura.

Por otro lado, para el desarrollo de un ciclo suficientemente ágil y que posibilite la máxima productividad, se deberá colocar el final de carrera que permite el cambio a la velocidad de aproximación en una ubicación adelantada 10° con respecto a la del sensor anteriormente descrito.

## 8. DISEÑO DE UTILLAJE

Otra de las tareas principales consideradas en el proyecto es el análisis y planteamiento de mejora del dispositivo de sustentación de los álabes en la mesa posicionadora. Este proceso ha sido desarrollado paralelamente al de la propia mesa posibilitando así el aprovechamiento del rediseño del utillaje para el planteamiento de diferentes alternativas adaptadas al mismo para la mesa.

Talleres Zitrón ha encargado el diseño a la empresa específicamente dedicada al trabajo con utillajes SOGIMA, lo cual denota la complejidad de la tarea.

Habiendo considerado el rediseño íntegro de la mesa posicionadora como objetivo fundamental del presente proyecto, la tarea aquí descrita referida al utillaje alcanza el análisis del sistema actual y sus puntos débiles, la determinación precisa de requisitos para el nuevo utillaje, el planteamiento de una serie de alternativas y su valoración.

Se pretende con ello generar una información útil para la empresa, así como una serie de ideas alternativas que pudieran servir como estímulo para la continuación del trabajo de diseño del utillaje.

### 8.1. Descripción del sistema actual

El sistema actual se basa en una cama fabricada en material polimérico de la marca OBO, sobre la que se asienta la pieza a soldar, ejecutándose su fijación mediante bridas de palanca. El bloque dispone en sus extremos de dos ejes que se atornillan sobre insertos metálicos roscados acoplados al material, de manera que se posibilita la sustentación al bastidor generándose además la posibilidad de giro del sistema.



**Ilustración 97. Utillaje actualmente empleado cargado (izqda.) y descargado (dcha.)**

Para el bloqueo de la posición deseada del utillaje se habilita un inserto de encaje sobre el que actúa el sistema de palancas específicamente diseñado instalado en el bastidor.



**Ilustración 98. Detalle del sistema de bloqueo por palanca**

Para conseguir una fijación completa del álabe este dispone de unas pestañas específicamente troqueladas, que se insertan entre dos placas metálicas dispuestas en el utillaje. Tras ello, se lleva a cabo el cierre de las bridas de palanca, a las que se ha acoplado un sistema para aumento del número de puntos de contacto, tratando así de conseguir una fijación óptima.



**Ilustración 99. Detalle de sistema de fijación de pestaña (izqda.) y ejemplos de pestañas troqueladas (dcha.)**

El material concreto con que se ejecuta el dispositivo es un tipo de poliuretano de la marca OBO diseñado específicamente para creación de matrices de fabricación. Se caracteriza por su elevada maquinabilidad, resistencia a elevadas temperaturas (su temperatura coeficiente de expansión térmica lineal de  $3 \cdot 10^{-5}$  1/K) y baja densidad.

## 8.2. Análisis

Se procede a continuación al análisis detallado de las características del utillaje planteado para detectar sus puntos débiles susceptibles de mejora, así como al planteamiento de los requisitos

que definen las necesidades establecidas para el diseño, posibilitando la generación de nuevas alternativas en busca de la solución óptima.

### 8.2.1. Puntos débiles

Los principales puntos débiles detectados tienen que ver con la dificultad de trabajo por parte del operario y por las imprecisiones generadas en la fijación. Se describen a continuación los principales aspectos susceptibles de mejora detectados en el sistema:

- Dificultad de inserción de las pletinas de la punta en su emplazamiento
- Baja capacidad de sustentación del sistema de bridas
- Elevado esfuerzo requerido para actuación del sistema de bloqueo
- Holguras en el sistema de bloqueo
- Imposibilidad de soldadura del extremo del álabe

Primeramente se destaca el complejo proceso de inserción de las pletinas troqueladas en la punta del álabe en los indexadores del utillaje debido a un ajuste excesivo, lo cual ralentiza el proceso de carga. Del mismo modo, la fuerza requerida para la actuación sobre el sistema de bloqueo por palanca resulta igualmente demasiado grande, resultando en una reducción de la productividad.

Se detectan también una serie de defectos que afectan a la calidad del producto final obtenido. Por un lado, la capacidad de sustentación de las bridas instaladas es insuficiente para lograr una fijación robusta que impida las deformaciones del álabe por efecto del enfriamiento tras la deposición de los cordones de soldadura.

Por otro lado, el sistema de bloqueo implementado consta de unas holguras que merman la precisión en el posicionado del álabe para la ejecución de su soldadura, lo cual hace que la automatización y precisión ofrecidas por el robot sean desaprovechadas.

Finalmente pensando en un proceso de fabricación idílico, el utillaje disponible actualmente hace imposible la ejecución de la soldadura de la tapa en la punta del álabe, que permitiría obtener álabes completamente fabricados en caso de ser habilitada.

### 8.2.2. Requisitos

En base al análisis realizado tanto del proceso general desarrollado en la célula, como particularmente de la mesa posicionadora y del utillaje existente disponible, se procede a continuación al planteamiento de los requisitos fundamentales que deben ser tenidos en consideración en el rediseño del sistema de sustentación del álabe:

- Material no deformable y resistente a las altas temperaturas
- Fijación robusta del álabe
- Facilidad de carga y descarga por parte del operario
- Colocación precisa en posición de soldadura
- Seguridad y fijación del álabe durante el proceso de soldado
- Posibilidad de adaptación a diferentes modelos de álabes

Los requisitos planteados tienen como objetivo fundamental optimizar al máximo el proceso de soldadura generando la máxima calidad en el producto final, así como facilitar al máximo el trabajo a desarrollar por parte del operario, generalmente de forma manual.

Como deseo adicional se plantea la posibilidad de ejecución de la soldadura completa del álabe, incluyéndose así en el proceso además de los perfiles laterales, el extremo de la punta del álabe.

### 8.3. Alternativas

En base al análisis ejecutado y a los requerimientos determinados se procede a continuación al planteamiento de una serie de diferentes alternativas de optimización del utillaje de sustentación del álabe. Las opciones abarcan desde la mejora del utillaje existente mediante diferentes modificaciones, hasta el rediseño íntegro del sistema.

Existen también otras posibilidades alternativas complejas como sistemas internos expansivos, ya utilizados en algunas industrias, o sistemas desmontables. Sin embargo la complejidad e inversión que suponen no es asumible en base a la moderada producción de la célula y a la variabilidad del proceso productivo, y es por ello que no son planteadas como verdaderas opciones en el análisis.

#### 8.3.1. Sujeción por inserción

Se plantea como solución una sustentación del álabe mediante el aprovechamiento del hueco interno del mismo. Al estar formado por dos chapas curvadas, se habilita en el interior un hueco que permite reducir su peso considerablemente. A través de la fabricación de un esqueleto interno apropiado, se llevaría a cabo la colocación del álabe por inserción, tras lo cual se podría ejecutar el fijado mediante diferentes metodologías, surgiendo así diferentes sub-variantes en base al sistema aplicado. El utillaje precisa un único punto de anclaje, quedando por tanto el conjunto en voladizo.

Este diseño posibilitaría una mayor rigidización del álabe evitando su deformación térmica durante el de enfriamiento tras la soldadura. Con él se habilita además la soldadura del perfil de la punta, pudiendo eliminarse además las pestañas adicionales necesarias en el sistema actual.

Para llevar a cabo la fijación del álabe una vez insertado se podría disponer un sistema de bloqueo mediante brida axial, o mediante un utillaje específico multipunto.

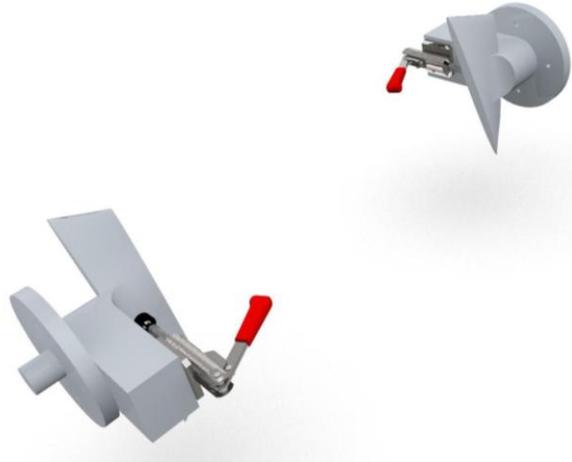


**Ilustración 100. Sujeción por inserción. Fijación mediante brida (izqda.) y utillaje específico (dcha.)**

El principal inconveniente del diseño planteado reside en la dificultad de inserción del álabe por su compleja geometría curvada y, por otro lado, la necesidad de un utillaje específico para cada tamaño de álabe soldado en la célula.

### 8.3.2. Inserción parcial

Con objeto de mejorar la estabilidad del utillaje, se dispone una variante del sistema de sujeción por inserción del álabe en un esqueleto interno en la que se habilitan dos puntos de apoyo. Para ello se diseñan dos esqueletos internos separados que se alojarán en la base y la punta del álabe respectivamente. Para llevar a cabo la fijación de la pieza en posición se llevaría a cabo el bloqueo mediante un sistema de bridas.



**Ilustración 101. Utillaje de inserción parcial**

La principal ventaja que presenta el sistema es la reducción de peso del conjunto global, al reducirse las dimensiones del esqueleto interno. Además se facilitaría la tarea de carga y descarga dado que no se precisaría ejecutar una inserción completa de la compleja geometría del álabe sobre el esqueleto, sino únicamente de sus extremos.

Presenta sin embargo una serie de inconvenientes como la escasa capacidad de rigidización del álabe o la dificultad de acoplamiento una mesa portadora.

### 8.3.3. Adaptación de utillaje actual

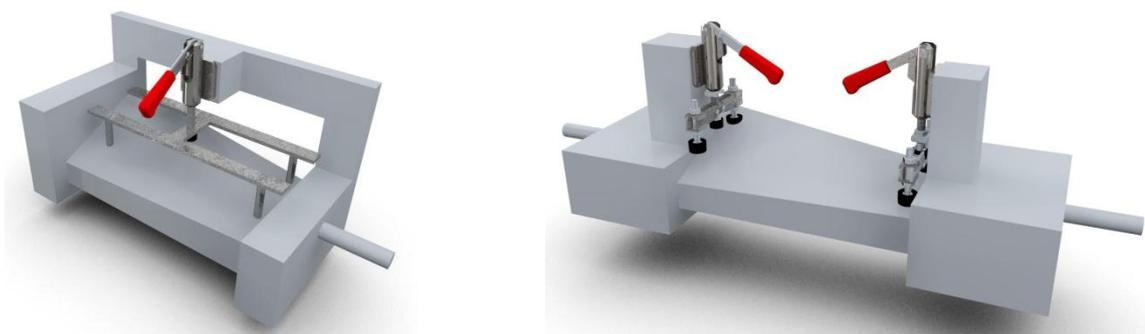
Aprovechando el utillaje actualmente disponible, podría llevarse a cabo la optimización de su diseño mediante el replanteo del sistema de fijación del álabe, tratando de conseguir una sustentación más robusta.

Para ello se plantean dos alternativas con una misma filosofía: la sustitución de las bridas de palanca de brazo perpendicular por bridas de accionamiento axial.

De acuerdo con los productos existentes en el mercado se ha observado que, para dimensiones equivalentes, las bridas axiales son capaces de ejercer fuerzas de apriete muy superiores a las de brazo perpendicular. Así, una brida de brazo perpendicular de 600g de peso se consigue una fuerza de apriete máxima de 2,7 kN. Mediante una brida axial de igual tamaño y del mismo fabricante la fuerza de apriete asciende a 7,2 kN.

Es por ello que para la consecución de un diseño óptimo se precisa incorporar bridas de carácter axial. Para su incorporación al utillaje disponible, se precisa un rediseño del mismo que permita su fijación. Para ello se plantean dos alternativas: una en la que se emplea una única brida axial

central, y otra en la que se dispone una en cada extremo del utillaje, permitiendo una fijación multipunto del álabe.

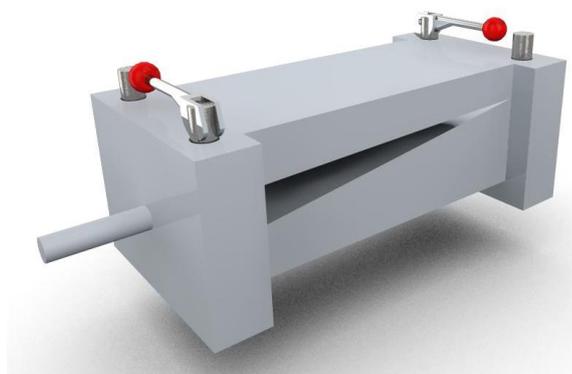


**Ilustración 102. Adaptación del utillaje actual con una (izqda.) y dos bridas axiales (dcha.)**

Las ventajas principales de este diseño son la elevada capacidad de fijación del álabe, así como el aprovechamiento del utillaje existente. Sus puntos débiles residen en el elevado volumen requerido para el acoplamiento de las bridas, así como la imposibilidad de soldadura de la punta del álabe.

#### 8.3.4. Doble cama

Basado en el diseño originariamente planteado para el utillaje se plantea el empleo de una segunda cama superior sobre el álabe, insertada sobre unos espárragos guía. La fijación se realiza por apriete de los medios de apriete apropiados generando la compresión de la pieza entre ambas matrices evitando así la curvatura del componente durante el proceso.



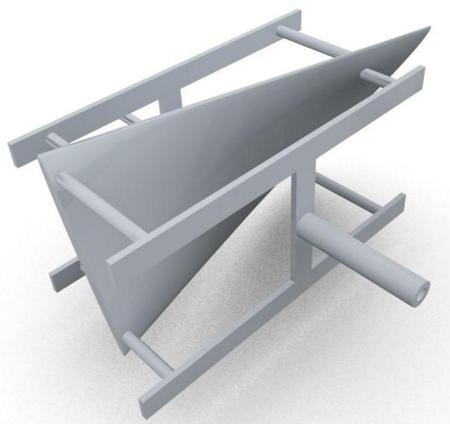
**Ilustración 103. Sustentación por doble cama**

Esta solución resulta óptima en lo que a adaptación a la geometría del álabe se refiere, así como para su fijación firme durante el proceso de soldadura. Los principales inconvenientes vienen por el excesivo volumen ocupado por el conjunto o por la lentitud del proceso de carga y descarga asociado.

#### 8.3.5. Amarre puntual transversal

Para la habilitación de la soldadura del perfil completo del álabe, incluida la punta del mismo, se plantea un diseño en que se pasa del habitual sistema de sustentación a lo largo del eje longitudinal de la pieza, a uno que se desarrolla de forma transversal al mismo.

Para ello se plantea un sistema de apriete multipunto en el que tanto los perfiles del álabe como su base y punta quedan perfectamente accesibles, ejecutándose el giro con respecto a un eje transversal de la pieza.



**Ilustración 104. Amarre puntual transversal**

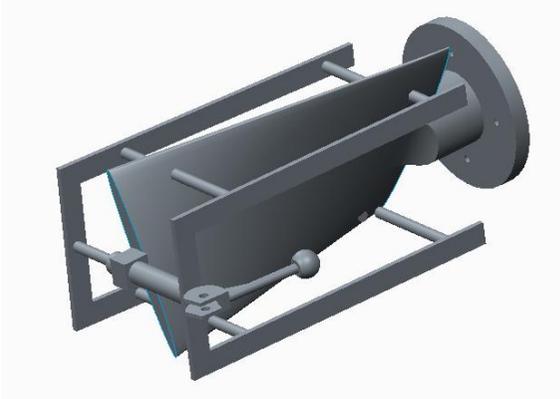
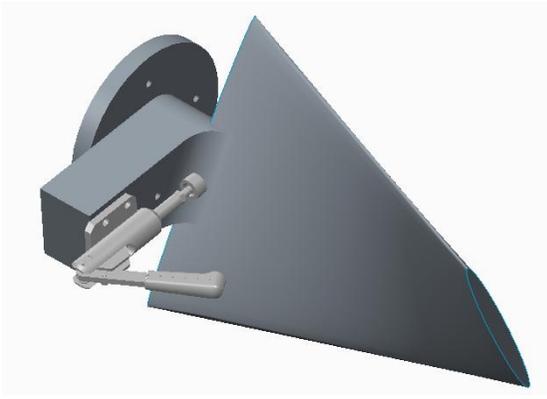
Las ventajas básicas de este diseño residen en la posibilidad de soldadura completa de la pieza y ligereza del conjunto. Además se plantea la fijación mediante un sistema de apriete axial beneficioso para la consecución de una elevada fuerza de sustentación.

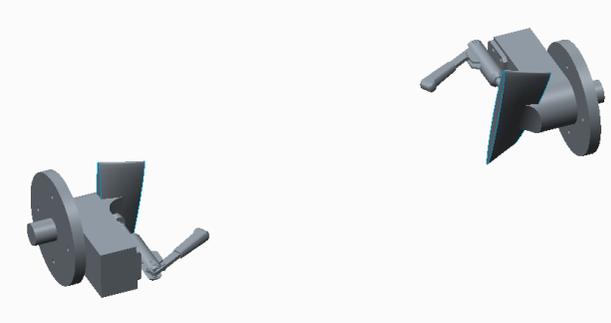
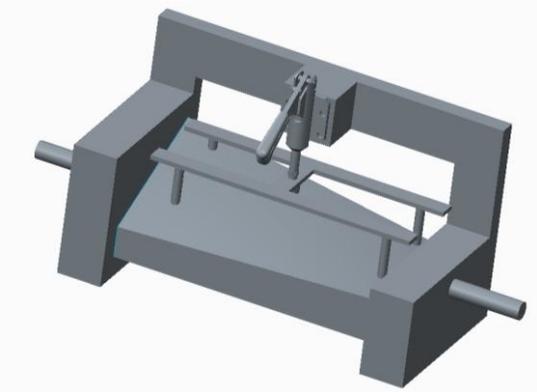
Los principales inconvenientes resulta ser el propio diseño complejo del conjunto, así como la dificultad de la operación de carga y descarga del álabe por parte del operario, precisando de algún medio auxiliar para la ubicación previa al apriete.

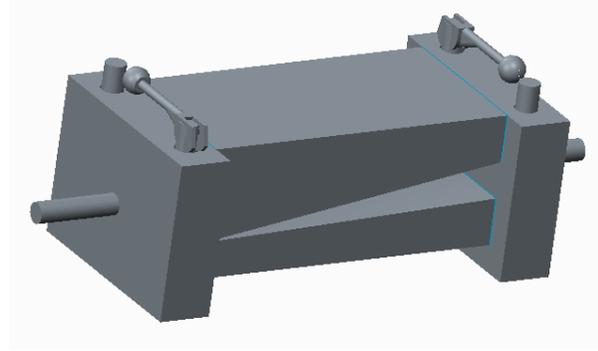
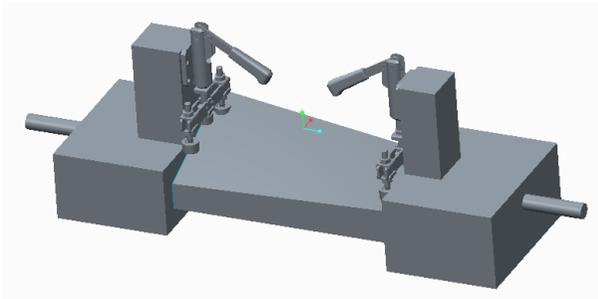
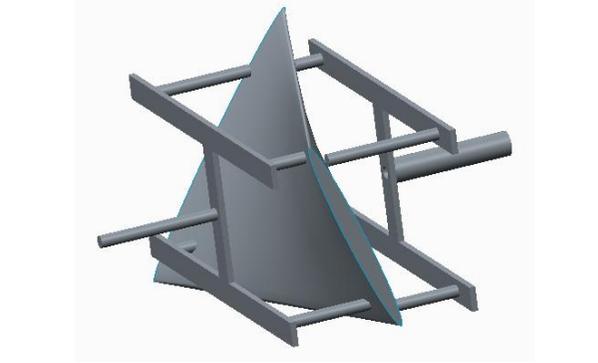
## **8.4. Resumen de alternativas**

Se presenta a continuación un resumen de las alternativas consideradas para el diseño del utillaje de sustentación de álabes para el proceso de soldadura en la célula estudiada, resumiendo además sus características típicas, así como ventajas y desventajas principales encontradas.

Tabla 16. Resumen de alternativas de diseño del utillaje porta-álabes

Nombre	Esquema	Características	Ventajas	Inconvenientes
1. Esqueleto interno		<ul style="list-style-type: none"> <li>-Esqueleto de álabe macizo interior</li> <li>-Material rígido</li> <li>-Fijación externa con brida axial</li> <li>-Voladizo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Sencillez de carga</li> <li>-Capacidad de resistencia a destorsión</li> <li>-Eliminación patillas fijación del álabe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Extremo del álabe inutilizable</li> <li>-Voluminoso</li> <li>-Complejidad del sistema de fijación</li> <li>-Aprovechamiento nulo de utillaje existente</li> <li>-Baja versatilidad</li> </ul>
1.b. Esqueleto interno con bridas		<ul style="list-style-type: none"> <li>-Álabe macizo interior</li> <li>-Material rígido</li> <li>-Fijación por brida axial única</li> <li>-Voladizo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Facilidad de carga</li> <li>-Intercambiable</li> <li>-Resistencia a destorsión</li> <li>-Eliminación patillas fijación del álabe</li> <li>-Punta libre</li> <li>-Compacto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Menor capacidad de fijación del álabe</li> <li>-Aprovechamiento nulo de utillaje existente</li> <li>-Punta del álabe accesible</li> </ul>

Nombre	Esquema	Características	Ventajas	Inconvenientes
<p>2. Inserción parcial</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>-Soportes de inserción en base y punta del álabe</li> <li>-Biapoyado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Sencillez de carga</li> <li>-Fijación por apriete</li> <li>-Ligero</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Resistencia a la destorsión del álabe</li> <li>-Aprovechamiento nulo de utillaje existente</li> <li>-Estabilidad</li> <li>-Extremo del álabe inaccesible</li> </ul>
<p>3. Adaptación de cuna actual</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>-Aprovechamiento diseño actual</li> <li>-Brida axial de fijación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Capacidad de resistencia a destorsión</li> <li>-Aprovechamiento máximo de utillaje existente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Volumen requerido</li> <li>-Extremo del álabe inaccesible</li> </ul>

Nombre	Esquema	Características	Ventajas	Inconvenientes
4. Doble cama		<ul style="list-style-type: none"> <li>-Cama simétrica a la actual</li> <li>-Fijación por apriete axial</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Adaptación perfecta al álabe</li> <li>-Capacidad resistente a la destorsión</li> <li>-Estabilidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Volumen</li> <li>-Extremo del álabe inaccesible</li> </ul>
5. Amarre puntual por extremos		<ul style="list-style-type: none"> <li>-4 puntos de apoyo extremos</li> <li>-Álabe biapoyado</li> <li>-Cierre por brida axial</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Capacidad resistente a la destorsión</li> <li>-Ligereza</li> <li>-Estabilidad del álabe</li> <li>-Apriete máximo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Volumen</li> <li>-Extremo del álabe inaccesible</li> </ul>
6. Amarre puntual transversal		<ul style="list-style-type: none"> <li>-4 puntos de apoyo</li> <li>-Apoyos transversales</li> <li>-Apriete axial por brida</li> <li>-Biapoyado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Capacidad resistente a la destorsión</li> <li>-Ligereza</li> <li>-Apriete axial</li> <li>-Extremos libres</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Complejidad mecánica de apoyos</li> <li>-Estabilidad comprometida</li> <li>-Carga y descarga compleja</li> </ul>

## 8.5. Valoración de alternativas

Para la selección de la alternativa óptima de entre las planteadas se ha llevado a cabo un proceso de evaluación de criterios ponderados para cada una, de forma equivalente a lo realizado en el apartado 6.4 para la selección del diseño óptimo de la mesa posicionadora.

En este caso, los criterios principales que han sido considerados son los siguientes:

-Facilidad de carga: analiza la simplicidad de operaciones necesarias para la carga y descarga de álabes en la célula, contemplando el esfuerzo, el tiempo, los medios adicionales requeridos

-Optimización del proceso: evalúa la posibilidad de optimizar el proceso desarrollando una soldadura idónea, además de permitir el ahorro máximo de material por ejemplo mediante la eliminación de patillas de fijación

-Volumen: espacio total ocupado por el utillaje

-Complejidad mecánica: analiza tanto la viabilidad de la fabricación de las piezas, su adquisición, su montaje y reemplazo

-Capacidad de fijación: evalúa la firmeza que presenta el utillaje frente a la deformación térmica del álabe durante su enfriamiento

-Estabilidad: capacidad de mantenimiento en posición del sistema que permite el desarrollo de un proceso de soldeo óptimo

- Aprovechamiento de utillaje existente: posibilidad de reutilización o reciclado de los elementos componentes del utillaje disponible actualmente

Los criterios más fuertemente ponderados dada su criticidad son la capacidad de fijación del álabe, la facilidad de carga y descarga así como la optimización del proceso ejecutado. Por otro lado, es el aprovechamiento del utillaje existente el que resulta de menor importancia en la valoración.

Los resultados obtenidos pueden ser apreciados en la tabla mostrada a continuación:

Tabla 17. Resumen de valoración de criterios para alternativas de utillajes

Id.	Nombre	Facilidad de carga	Optimización de proceso	Volumen	Complejidad mecánica	Capacidad de fijación	Estabilidad	Aprov. Util. existente	Total	Orden
Ponderación		20%	20%	7%	13%	22%	13%	5%		
1	Esqueleto interno	2	4	2	1	4	3	1	279	5
2	Esqueleto interno brida	4	4	4	1	3	3	1	311	2
3	Inserción parcial	3	2	4	4	1	2	1	233	6
4	Adaptación actual	3	2	2	3	3	4	3	286	4
5	Doble cuna	3	2	1	4	4	4	4	319	1
6	Amarre puntual	3	3	1	3	3	4	3	299	3
7	Amarre transversal	2	3	2	3	2	1	1	215	7

Para la valoración de los diferentes criterios se ha adoptado la siguiente escala:

1	Muy malo
2	Malo
3	Bueno
4	Muy bueno

Analizando los resultados reflejados en la Tabla 17 se puede observar que el sistema mejor valorado para llevar a cabo la sustentación del álabe es la alternativa de fijación por doble cuna. Su capacidad de fijación, sencillez de diseño y facilidad de carga y descarga son sus puntos fuertes principales. El diseño se ve penalizado únicamente por el elevado volumen requerido.

En segundo lugar se sitúa la adaptación del sistema actual y su mejora a través de sistemas de fijación más efectivos, que posibilitan una sustentación firme, además de un sencillo proceso de carga y descarga. Se posibilita además el aprovechamiento del diseño actual pudiendo la solución ser implementada en un corto plazo de tiempo.

La idoneidad del sistema de esqueleto interno en lo que a capacidad de fijación se refiere se ve penalizada por la complejidad mecánica inherente del diseño y del proceso de inserción y extracción de álabes con un grado de torsión elevado.

Las opciones menos interesantes resultan ser el amarre transversal y la inserción parcial por su dificultad de carga y descarga y complejidad mecánica.

Queda por tanto así analizado el sistema de sustentación de álabes, habiéndose planteado una serie de múltiples y muy diferentes alternativas. Tras una valoración objetiva de cada una de ellas en relación a los aspectos más importantes de los requisitos planteados para su diseño, se ha planteado la considerada mejor opción para dar solución a la problemática.

## 9. **ESTUDIO DE CICLO DE TRABAJO**

Como cuarta tarea fundamental del presente proyecto se ha llevado a cabo un estudio del ciclo de trabajo ejecutado en la misma. El objetivo fundamental del análisis es, además de la recopilación de una información de potencial interés para la empresa, posibilitar el diseño idóneo de mejora de la célula en base a la experiencia registrada, buscando un compromiso entre la capacidad y velocidad de robot y operario.

Es por ello que el estudio ha sido desarrollado de forma paralela a las tareas de diseño de optimización de la célula, obteniéndose así datos relevantes empleados en el mismo, detallados a lo largo de todo el trabajo allí donde han sido empleados.

Para la ejecución de esta tarea se ha estudiado el ciclo de trabajo *in situ* durante un día de producción normal en la fábrica. Se han ejecutado las mediciones pertinentes para el desarrollo de dos estudios básicos: análisis de tiempos y de temperaturas.

### 9.1. **Análisis de tiempos**

El estudio ejecutado registra los tiempos empleados en el desarrollo de las diferentes tareas del ciclo de trabajo completo de la célula.

#### 9.1.1. **Descripción del ciclo de trabajo**

Para facilitar el entendimiento de los resultados registrados y aquí constatados, se procede a continuación a la descripción de las tareas desarrolladas durante el ciclo de trabajo.

Se describe un ciclo de trabajo estándar intermedio, en el que se parte de la mesa completamente cargada con una tanda de álabes ya soldados. Los trabajos llevados a cabo son los siguientes:

#### **Descarga y carga de álabes**

1. Desamarre de los álabes soldados: el operario gira inicialmente los utillajes 90° tras la actuación sobre la palanca de bloqueo de los mismos. Tras ello libera las bridas de fijación de los cuatro álabes existentes en el bastidor en la zona de carga ya soldados.
2. Descarga de los álabes: a continuación procede a la extracción de los 4 álabes soldados y, tras una breve inspección visual en busca de defectos en la soldadura, los clasifica y almacena según sean válidos o no
3. Esmerilado de cada nuevo álabe: de forma previa a la carga de los nuevos álabes en la mesa, el operario procede al esmerilado de los puntos de soldadura previos dispuestos en los álabes, para eliminar el material sobrante y permitir el desarrollo posterior de un cordón de calidad.
4. Carga de cada álabe esmerilado: tras el proceso de esmerilado, el operario carga el álabe en el utillaje libre, llevando a cabo la fijación mediante el bloqueo de las bridas dispuestas para tal

cometido. Finalizado dicho proceso, se restaura la posición girada 90° del utillaje a través del accionamiento de la palanca de bloqueo.

5. Volteo de la mesa: completada la carga de los cuatro álabes y tras la pulsación del botón pertinente, se ejecuta el volteo completo de la mesa, disponiéndose el bastidor cargado en la zona del robot, y el que contiene los álabes ya soldados en la zona de carga.

### **Procedimiento de soldadura**

1. Soldadura del primer cordón: el robot ejecuta inicialmente la soldadura del perfil superior del álabe. Para el análisis se registra de forma individualizada para cada álabe el tiempo empleado por el robot desde su partida del punto de reposo último, hasta el final de la deposición del cordón.

2. Giro de la estación: finalizada la deposición de los cordones de soldadura sobre los cuatro álabes, se procede al volteo de la estación, quedando dispuestos al robot los perfiles sin soldar.

3. Soldadura del segundo cordón: el robot procede a la ejecución de la soldadura del segundo y último cordón de cada álabe. De nuevo se registra el tiempo individual de soldadura de cada uno de los cuatro álabes.

Queda por tanto definido el ciclo de trabajo desarrollado para el cual se han llevado a cabo las mediciones de tiempos mediante un cronómetro digital de precisión. El análisis se desarrolló el día 27 de Marzo de 2015 en el trabajo desarrollado entre las 9.00 y las 12.00, siendo el operario de la célula Jesús Morán. Tras los procesos de preparación y ajuste del funcionamiento se ejecutaron 2 ciclos completos de soldadura, siendo por tanto fabricados un total de 16 álabes.

Los resultados obtenidos quedan reflejados en la siguiente tabla:

Tabla 18. Registros de tiempos del ciclo de trabajo

Álabe	Tiempo desamarre (x4 alabes)	Tiempo de descarga	Tiempo esmerilado	Tiempo de carga	Tiempo de soldadura de cordón 1	Tiempo de soldadura de cordón opuesto	Tiempo de soldadura completo	Tiempo giro estación	Tiempo volteo mesa
1	00:13,2	00:09,4	00:42,9	00:15,4	00:47,9	00:48,5	01:36,4	00:20,0	00:42,5
2		00:21,8	00:27,9	00:13,7	00:48,8	00:46,7	01:35,5	00:20,4	00:40,1
3		00:17,5	00:34,0	00:08,1	00:48,4	00:47,1	01:35,5	00:18,6	00:39,0
4		00:13,1	00:29,9	00:17,6	00:49,4	00:48,2	01:37,6	00:19,1	00:44,0
5	00:15,8	00:07,1	00:32,5	00:13,5	00:48,0	00:50,2	01:38,2	00:20,5	00:42,1
6		00:10,5	00:29,6	00:13,3	00:48,3	00:47,0	01:35,2	00:20,0	00:42,7
7		00:09,3	00:32,1	00:15,0	00:48,4	00:47,3	01:35,7	00:18,7	00:43,5
8		00:15,2	00:33,2	00:16,6	00:49,0	00:47,0	01:36,0	00:20,1	00:44,0
9	00:11,1	00:14,7	00:28,1	00:39,2	00:49,6	00:46,3	01:35,9	00:18,7	00:41,5
10		00:11,2	00:40,1	00:12,2	00:48,3	00:46,9	01:35,2	00:20,0	00:40,2
11		00:23,0	00:35,5	00:11,2	00:49,1	00:47,4	01:36,5	00:19,5	00:44,1
12		00:08,5	00:28,2	00:15,8	00:48,4	00:44,9	01:33,2	00:19,7	00:42,5
13	00:12,5	00:10,5	00:40,1	00:10,2	00:48,9	00:47,7	01:36,6	00:20,0	00:43,0
14		00:09,5	00:28,5	00:16,3	00:48,7	00:47,0	01:35,8	00:20,7	00:43,1
15		00:10,4	00:30,5	00:17,3	00:48,2	00:47,9	01:36,1	00:20,1	00:42,0
16		00:12,1	00:31,2	00:13,3	00:49,2	00:47,7	01:36,9	00:20,5	00:43,8
Media	00:13,1	00:12,7	00:32,8	00:15,5	00:48,7	00:47,4	01:36,3	00:19,8	00:42,4

Se ha realizado un promedio de los tiempos para obtener una estimación aproximada independiente de posibles particularidades de cada instante.

Los resultados principales que se deducen son:

- El tiempo total requerido para completar un ciclo de soldadura de 8 álabes es de: 14 minutos 52 segundos.
- El tiempo medio requerido para la soldadura de los 4 álabes dispuestos en un bastidor es de 6 minutos 25 segundos.
- El tiempo medio de soldadura de un álabe completo (sin incluir el volteo de la estación) es de 1 minuto 36 segundos.
- El tiempo medio de soldadura de un único cordón asciende a 48 segundos.
- El tiempo medio de descarga y carga de 4 álabes (incluyendo el esmerilado) es de 4 minutos 4 segundos.
- El tiempo medio de carga, esmerilado y descarga de un único álabe es de 1 minuto y 1 segundo.
- El tiempo empleado por la mesa en la ejecución del volteo de cada estación es de 20 segundos.
- El tiempo medio de volteo de la mesa completa es de 42 segundos.
- El tiempo medio empleado por el operario en el proceso de esmerilado es de 32 segundos.

Del análisis se extrae que, en condiciones normales, el proceso de descarga, esmerilado y carga de una serie de 4 álabes (4:04 min) es inferior al tiempo requerido para completar la soldadura de los 8 cordones precisados por estación (6:25 min).

Se registran tiempos con muy baja desviación con respecto de la media en el desarrollo de los cordones, que asciende a 48 segundos.

Sucede completamente lo contrario en el caso del proceso de esmerilado, en que la aleatoriedad del proceso es extrema, registrándose tiempos mínimos de 27 segundos y máximos de 42.

También se aprecia una gran heterogeneidad de los valores registrados para los tiempos de descarga debido a la diferente dificultad presentada para la liberación del sistema de anclaje. Algo similar sucede en el proceso de carga, en que se dan situaciones en las que el operario precisa de una herramienta auxiliar para completar el asentamiento de la pieza sobre el utillaje.

El análisis ha servido para cerciorar que, con un diseño como el propuesto para la mejora de la célula en que se desarrolla un ciclo continuo (y no por tandas de 4 álabes), el tiempo requerido por el operario para el proceso de descarga, preparación y carga de un álabe (1:01 min) es inferior al precisado para completar los dos cordones de soldadura (1:36 min). Ello permite la consecución de una elevada productividad con el diseño renovado planteado.

Por otro lado, la determinación del tiempo total de soldadura empleado para cada álabe ha posibilitado el cálculo de la capacidad mínima requerida para el diseño renovado de la mesa referido en el apartado 7.1.

Otros datos importantes obtenidos del análisis son los tiempos empleados en los movimientos de la mesa, que posibilitan la estimación de velocidades seleccionadas para los motores, empleadas como fundamento para el nuevo diseño.

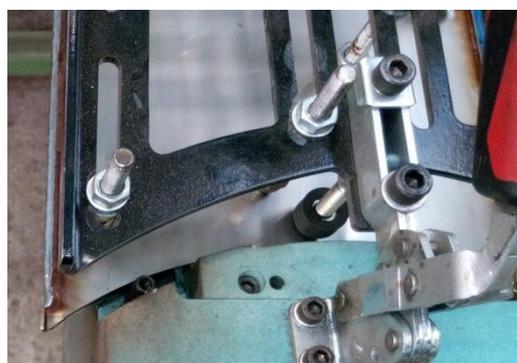
## 9.2. Análisis de temperaturas

El segundo análisis desarrollado evalúa las temperaturas alcanzadas por los álabes durante el proceso de soldadura. El objeto del estudio, aparte del posible interés de la empresa en el recabado de dichos datos, consiste en posibilitar el correcto diseño de la mejora propuesta para la célula de soldadura.

Como es explicado en el apartado 7.5.3.2, se planea la utilización de un sensor inductivo similar a los instalados en la mesa actual para detectar la presencia de un álabe en el utillaje. Es por ello que se hace preciso evaluar la adecuación del sensor a las condiciones de trabajo desarrolladas.

Según el funcionamiento deseado para el nuevo diseño, se produce una situación en que la parte del álabe recién soldada queda enfrentada al sensor E2A de OMRON, que tiene una capacidad de trabajo en ambientes con temperaturas de hasta 70°C. A través del estudio de temperaturas planteado se pretende validar el uso de dicho modelo o, por el contrario, facilitar la elección de un sensor específicamente concebido para trabajo a altas temperaturas.

La medición ha sido llevada a cabo con un termómetro laser de la marca FLUKE durante el ciclo de soldadura de 4 álabes el día 27 de Abril de 2015 a las 9.00, con una temperatura ambiente en la zona de la célula de aproximadamente 15°C, siendo el operario de la misma Jesús Morán.



**Ilustración 105.** Termómetro láser empleado (izqda.) y zona del álabe en que se ejecuta la medición (dcha.)

Se desarrollan tres mediciones por álabe, ejecutadas todas ellas en la zona inicial del cordón de soldadura, parte a la que se planea enfrentar el sensor inductivo. La primera medición se ejecuta en el instante inmediato tras la finalización del cordón, la segunda pasados 10 segundos y la última, transcurridos 30 segundos.

Los valores registrados se muestran en la siguiente tabla. Cabe destacar que las temperaturas mostradas son las alcanzadas en la propia chapa del álabe, siendo por tanto las desarrolladas en la zona del sensor, separada aproximadamente 5 mm, claramente inferiores.

Tabla 19. Valores registrados de temperatura

Cordón	Temperatura inmediata [°C]	Temperatura tras 10 seg [°C]	Temperatura tras 30 seg [°C]
1	247	135	70
2	258	130	68
3	250	130	70
4	236	138	68
5	207	130	80
6	265	138	87
7	271	126	90
8	264	128	89
Media	250	132	78

De los datos recabados se aprecia una temperatura media sobre la chapa en el instante inmediato de finalización del cordón de unos 250°C, siendo los valores máximo y mínimo registrado respectivamente de 271 y 207°C.

Tras 10 segundos, la temperatura media del álabe en la zona evaluada disminuye hasta 132°C, cayendo hasta 78°C transcurridos 30 segundos.

En base a estos datos se evalúa la adecuación del sensor disponible. Esta justificación queda detallada en el apartado 7.5.3.2.

### 9.3. Planificación del ciclo de trabajo para el diseño planteado

Se describe a continuación el ciclo de trabajo planeado para la célula con el diseño mejorado planteado.

El diseño ha sido concebido para posibilitar un trabajo en paralelo de robot y operario, de manera que mientras el primero ejecuta la soldadura completa de un álabe, el segundo lleva a cabo la el reemplazo de un álabe soldado por uno nuevo. Así pues, se describen a continuación las tareas ejecutadas durante ambos procesos que como se menciona, son desarrollados simultáneamente.

#### Descarga y carga

1. Desamarre del álabes soldado: el operario libera las bridas de fijación del álabe dispuesto en la zona de carga y descarga. Según el diseño con un mecanismo de guía - seguidor, no se precisa el giro del utillaje para su descarga, lo cual reducirá notablemente el tiempo de descarga.

2. Descarga del álabes: se lleva a cabo la extracción del álabe del utillaje para, tras una breve inspección visual en busca de defectos en la soldadura, llevar a cabo su clasificación y almacenamiento en función de su validez.

3. Esmerilado de nuevo álabe: el operario lleva a cabo la preparación de nuevo álabe mediante el esmerilado de los puntos de soldadura previos.

4. Carga del nuevo álabe: una vez preparado, el operario carga el álabe en el utillaje libre, llevando a cabo la fijación mediante el bloqueo de las bridas dispuestas para tal cometido. De nuevo no se hace precisa ninguna actuación, dado que será el propio diseño del utillaje el que le permita adoptar la posición precisa de soldadura.

5. Girado de la mesa: una vez cargado el álabe, habiendo finalizado el proceso de soldadura, y habiendo accionado el operario el pulsador de ALABE CARGADO, se desarrolla el avance de 45° de la mesa, disponiendo un nuevo álabe para ser reemplazado (siempre que no haya ninguna persona en la zona de carga).

### **Procedimiento de soldadura**

1. Soldadura del primer cordón: tras la fijación en posición del utillaje mediante el sistema de indexado, el robot ejecuta inicialmente la soldadura del perfil superior del álabe.

2. Giro del utillaje: concluido el proceso de soldadura del primer perfil, se lleva a cabo el volteo del utillaje mediante el actuador neumático de giro, quedando el segundo perfil a soldar accesible.

3. Soldadura del segundo cordón: tras el indexado para aseguramiento de la posición exacta de soldadura, el robot procede a la ejecución del segundo y último cordón del álabe.

Según el análisis de tiempos desarrollado en el apartado 9.1 se precisa un tiempo medio 1:36 min para completar los dos cordones de soldadura de un álabe. En ese intervalo y según los datos registrados, el operario tiene tiempo suficiente para descargar el álabe ya soldado, y preparar y cargar el nuevo, ya que con el diseño actual precisa una media de 1:01 min. Dicho tiempo se verá claramente reducido en la célula mejorada planteada dado que se elimina la necesidad de giro del utillaje para su descarga, y la consecuente actuación sobre el sistema de bloqueo por palanca.

Además, en el caso de que el operario precisase, por anomalías, un tiempo superior al de soldadura, la mesa se mantiene en espera hasta la pulsación del botón de ALABE CARGADO, lo cual permite la seguridad del usuario, reforzada más si cabe por la barrera de detección de presencia.

Según la configuración y programación planteada para la actuación del motorreductor de giro explicada en el apartado 7.7.4, el tiempo requerido para el avance de un puesto en la mesa de trabajo será de 5 segundos.

El proceso explicado será repetido de forma continuada durante el turno de trabajo del operario, eliminándose así la división en ciclos de 4 álabes existente en la mesa actual.

Queda así explicado el funcionamiento previsto para el diseño planteado de la célula mejorada.

## **10. CONCLUSIONES**

Finalizado el trabajo planteado, se procede a continuación a la presentación de las conclusiones principales alcanzadas, haciendo además constancia del grado de satisfacción de los objetivos planteados, y presentando las principales lecciones aprendidas.

### **10.1. Desarrollo de las tareas**

Se han desarrollado todas las tareas planteadas al inicio como objetivos principales del presente trabajo fin de máster. El grado de cumplimiento de cada una de ellas ha venido determinado por el tiempo disponible, habiendo sido completadas al 100% todas las tareas previstas, excepto el diseño en detalle del utillaje. A continuación se hace una revisión de los hitos logrados:

- Se ha completado un análisis detallado de la célula actualmente en uso en la empresa, a todos los niveles mecatrónicos.
- La mesa posicionadora actual ha sido modelada en el software habitual de la empresa (Creo Parametric).
- Se han identificado todos los componentes eléctricos, electrónicos, sensores y actuadores involucrados en la célula.
- Se han estudiado los diseños mecánico, eléctrico y de programación de la célula actual.
- Por recomendación del tutor de empresa, se ha prescindido de la re-elaboración de los planos de la célula actual, en detrimento del desarrollo detallado de la mejora planteada.
- Se han analizado las características globales de la célula, en búsqueda de sus puntos débiles potencialmente mejorables
- Se ha llevado a cabo una evaluación y planteamiento de requisitos y necesidades para el desarrollo de la optimización de la célula. Para ello se han analizado los intereses de las personas involucradas en la célula: operario, jefe de taller, diseñador mecánico y diseñador eléctrico y programador.
- A partir de la experiencia recabada y los requisitos implantados se han generado una serie de alternativas para la mejora de la célula.
- Se ha llevado a cabo un proceso de valoración de cada una de ellas, con participación activa de las personas implicadas antes mencionadas, así como del tutor académico.
- Se ha llevado a cabo el desarrollo detallado del diseño mecatrónico de la opción mejor valorada, para lo cual:
  - Se ha diseñado mecánicamente una nueva mesa posicionadora
  - Se han ejecutado los cálculos precisados para el alcance de un diseño óptimo (método de los elementos finitos, etc.)
  - Se han seleccionado los actuadores idóneos para el desarrollo de la funcionalidad
  - Se ha desarrollado el diseño eléctrico necesario
  - Se han elegido los componentes eléctricos y electrónicos precisos para dicho diseño
  - Se ha ejecutado el diseño del circuito neumático instalado

- Se ha desarrollado la programación óptima para el funcionamiento productivo y ergonómico de la célula
- Se ha planteado un diseño íntegro con los precisados requerimientos de seguridad
- Se ha desarrollado la configuración precisa de los componentes (variador de frecuencia) para la consecución de movimientos compatibles con la seguridad y la productividad.
- Se han generado los archivos y documentación precisada involucrados en el diseño íntegro de la célula optimizada:
  - Modelo 3D de la célula en el software CREO PARAMETRIC.
  - Planos de fabricación de la célula completa y, específicamente, de la mesa posicionadora y cada una de las piezas involucradas.
  - Planos eléctricos requeridos para la ejecución de la célula: de situación, unifilares, de conexiónado, listas de conexiones y listas de materiales.
  - Programa específico para el autómatas de seguridad G9SP de OMRON.
  - Diagrama de estados del funcionamiento planteado de la célula optimizada.
  - Programa de control para el autómatas CP1L de OMRON.
- Se ha desarrollado la descripción detallada del utillaje empleado en la célula actual.
- Se han analizado los puntos débiles susceptibles de mejora del mismo.
- Se han planteado las especificaciones, requisitos y deseos a tener en consideración en el diseño mejorado del utillaje.
- Se han planteado una serie de alternativas de sistemas de sustentación del álabe.
- Se ha llevado a cabo una valoración ponderada en base a diferentes criterios de las diferentes alternativas.
- Se ha seleccionado y justificado la considerada mejor opción para la optimización del diseño.
- Se ha llevado a cabo un estudio detallado in situ del proceso desarrollado en la célula.
- Se han registrado los tiempos empleados en la ejecución de las diferentes tareas desarrolladas para la soldadura de los álabes en la célula contemplada.
- Se han analizado los resultados obtenidos en el estudio de tiempos.
- Se han recabado datos referidos a las temperaturas alcanzadas en los álabes durante el proceso de soldadura.
- Se han evaluado y utilizado en otras tareas del proyecto los resultados obtenidos del estudio de temperaturas.
- Se ha descrito el ciclo de trabajo planificado para la célula optimizada desarrollada, con descripción de las tareas involucradas.

Se concluye por tanto que el grado de satisfacción de los objetivos planteados es muy elevado, habiéndose abarcado múltiples tareas de sumo interés que han sido completadas en su totalidad.

## 10.2. Lecciones aprendidas

Con el proyecto desarrollado se han acometido múltiples tareas con diferentes grados de dificultad, que han sido solucionadas con éxito y que han posibilitado la adquisición de nuevas habilidades, conocimientos y, sobre todo, experiencia.

A continuación se resumen las lecciones aprendidas, no sólo en el desarrollo del trabajo, sino también con la estancia en la empresa Zitrón y el consecuente contacto con la realidad empresarial y personal experimentado:

- Implementación práctica de la teoría: la tarea de recopilación de la información de la célula actual existente ha posibilitado apreciar el proceso completo que fue desarrollado desde el diseño mecánico, eléctrico y electrónico hasta la ejecución de la célula en el taller, y su funcionamiento real.
- Necesidad de comunicación: una de las lecciones más valiosas extraídas del análisis global es la necesidad imperiosa de comunicación entre las diferentes y múltiples partes involucradas en un desarrollo como el tratado: desde el operario que finalmente manejará el equipo (que proporciona la información quizás más importante), hasta los diseñadores mecánico y eléctrico del mismo. Esto denota la importancia de la filosofía mecatrónica en el mundo actual.
- Importancia de la seguridad: uno de los aspectos sobre los que más hincapié se ha hecho durante el desarrollo de la célula optimizada, ha sido la necesidad ineludible de mantener un adecuado nivel de seguridad para las piezas fabricadas, los componentes involucrados pero, sobre todo, para el personal involucrado en el funcionamiento habitual.
- Diseño para fabricación y montaje: en lo que al diseño mecánico se refiere, se ha comprobado la elevada importancia de la consideración de las posibilidades y limitaciones de los procesos de fabricación, así como la búsqueda de la simplificación del proceso de montaje. El hecho de trabajar a diario en la Oficina de Planificación de las Tareas, con personas dedicadas exclusivamente a la organización de los trabajos de fabricación y montaje, y la libertad de acceso al taller de fabricación de la empresa para apreciación de los diferentes métodos de fabricación, ha supuesto la adquisición de unos conocimientos y experiencia de un valor incalculable.
- Diseño considerando el ambiente de trabajo: también en relación con el diseño mecánico se ha apreciado la importancia de la toma en consideración del ámbito en que se desarrolla la funcionalidad del equipo. Se hacen así necesarias medidas para asegurar el correcto funcionamiento del equipo y evitar fallos puntuales o el desgaste prematuro de los componentes debido, por ejemplo, a la intromisión de suciedad en los elementos rodantes. Éste es un aspecto difícilmente reconocible sin la experiencia necesaria.
- Generación de documentación de calidad: se ha apreciado la especial importancia de la elaboración de calidad de la documentación necesaria para la implementación de los diseños planteados, tanto a nivel eléctrico como, sobre todo, a nivel de fabricación mecánica. Debido en parte al trabajo en la OPT, con un flujo masivo diario de planos, y a los conocimientos proporcionados por el tutor académico se ha adquirido experiencia y conocimientos para esta tarea.
- Simplificación del diseño eléctrico y programación: en el apartado referido al diseño electrónico y a la programación de los diferentes elementos, la principal lección aprendida es la importancia de un diseño global sencillo, así como la selección de componentes versátiles que permitan una gran flexibilidad. Destaca así la necesidad de simplicidad en los diseños y programas para su fácil implementación y, sobre todo,

posibles modificaciones o correcciones futuras. Además, considerando las características del proyecto acometido, prevalece el aseguramiento de una versatilidad y flexibilidad máximas, lo cual marca la selección de componentes. Este criterio es el que hace, por ejemplo, que la práctica mayoría de los componentes electrónicos de la mesa actual puedan ser reciclados y aplicados al diseño renovado planteado para la célula.

- Contacto con el taller y suministradores: la estancia en la empresa y la libertad proporcionada han posibilitado un contacto directo con el taller, y por tanto con los procesos allí desarrollados y el personal involucrado. Ello supone una experiencia de tremendo valor, muy difícilmente accesible. De igual modo se ha establecido un contacto directo con suministradores comerciales (por ejemplo de accionadores eléctricos, coronas de giro, etc.) del cual se han obtenido también importantes lecciones, sobre todo para la adaptación de los diseños a las soluciones comercialmente disponibles y más apropiadas.
- Manejo de nuevo software: otro de los resultados del desarrollo del presente trabajo debido a la necesidad de adaptación a los materiales disponibles en la empresa ha sido el aprendizaje en el manejo de nuevos software, tanto de carácter mecánico (CREO Parametric), eléctrico (E-Plan8) como de programación de autómatas (CX-Programmer).

### **10.3. Conclusiones finales**

El desarrollo del presente trabajo fin de máster ha supuesto una experiencia de gran valor, no sólo por las amplias y diversas tareas ejecutadas, sino también (y principalmente) por la posibilidad de estancia diaria en la empresa Zitrón, tomando así contacto con la realidad y necesidades empresariales.

El ambiente de trabajo, la libertad proporcionada y el interés demostrado no sólo por las personas directamente involucradas en el presente proyecto (tutor de empresa, operario, diseñadores mecánico y eléctrico) sino también por todas las personas conocidas durante los tres meses de estancia han posibilitado el aprovechamiento máximo de la misma.

Resultan de especial valor los conocimientos adquiridos gracias a la experiencia del múltiple personal tratado, así como de la directa presencia diaria en la oficina y en el propio taller.

Todo lo mencionado ha contribuido como importante estímulo para el desarrollo del proyecto, generando además un excepcional interés para la satisfacción de los objetivos, buscando la máxima perfección posible, y permitiendo disfrutar del esfuerzo y la dedicación puestos en el trabajo.

Desde el punto de vista académico, la conclusión más importante surge de la detección de una necesidad imperiosa de la mecatrónica en el mundo actual, lo que pone en alza y refuerza la filosofía del Máster.

Así, los conocimientos y habilidades adquiridas durante estos dos años han permitido acometer el análisis de un proyecto ya en funcionamiento, entender todas sus particularidades a todos los niveles (mecánica, actuadores, electricidad, electrónica, programación, sensores), evaluar sus puntos débiles y plantear las mejoras susceptibles de ser aplicadas.

Todo lo aprendido durante el Máster dispone las herramientas de partida precisas para la ejecución de un proyecto mecatrónico completo, desde el planteamiento de requerimientos y necesidades iniciales, hasta la generación de la documentación necesaria para su implementación, pasando por todos los procesos de diseño, selección y desarrollo de todas y cada una de las diferentes partes involucradas.

Aplicando un esfuerzo adicional para la profundización en los diferentes aspectos particulares, se han conseguido completar las tareas planteadas en este ambicioso proyecto mecatrónico.

## 11. **BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS**

- [1] Sunarc Tecnología en soldadura. *Soldadura MIG-MAG*. Sunarc, España, 2005.
- [2] M. Reina Gomez. *Soldadura de los aceros: aplicaciones*. M. Reina Gómez 4ª Ed. 2003.
- [3] Ingemecánica. *Fundamentos de la soldadura MIG-MAG*. Ingemecánica tutoriales. Disponible vía: <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn53.html#introduccion>
- [4] ThyssenKrupp Aceros y Servicios S.A., *Acero AISI-316L*. ThyssenKrupp, España, 2007.
- [5] ESAB. *Welder Guide Book. All positional rutile flux cored wires for non and low alloyed steels*. ESAB Welding and Cutting, 2011.
- [6] Easom Automation. *Welding positioners*. Easom Automation. Disponible vía: <http://www.easomeng.com/welding-positioners.php>
- [7] Inser Robótica. *Mesas posicionadoras*. Inser España. Disponible vía: <http://www.inser-robotica.com/OLD/soldaduraMesas.htm>
- [8] FlexArc. *Células robotizadas de soldadura en arco*. ABB España, 2012.
- [9] Förster Welding Systems, *Sistemas de mesas de soldar en 3D. Dispositivos. Automatización*. Förster, 2012.
- [10] Fronius. *Robacta, Robacta Drive. Antorchas de robot MIG/MAG*. Fronius España, 2008.
- [11] Fronius. *Cold Metal Transfer. La tecnología*. Fronius España, 2011.
- [12] Diario Oficial de la Unión Europea. *Directiva 2006/42/CE relativa a las máquinas*. Comunidad Europea, 2006.
- [13] Schneider Electric. *Manual de seguridad en máquinas*. Schneider Electric España, 2010.
- [14] Rockwell Automation. *Safebook 4. Sistemas de seguridad para maquinaria industrial*. Allen Bradley, 2011.
- [15] Obo-Werke. *Obomodulan PU Boards*. Obo Deutschland. Disponible vía: <http://www.obo-werke.de/en/products/obomodulanr-pu-boards.html>
- [16] Asociación para la promoción técnica del acero. *El acero en la construcción*. APTA, España, 2011.
- [17] Aleaceros. *Aceros al carbono: calidad F-1110*. Aleaceros, España, 2013.
- [18] Outokumpu. *Steel Grades, Properties and global standards*. Outokumpu, Finlandia, 2013.
- [19] S. Poveda Martínez. *Dibujo de piezas de chapa*. Visual Graphics Group, 2009.
- [20] EPLAN Software & Service. *EPLAN Electric P8 Manual de iniciación*. EPLAN Electric, Barcelona, España, 2015.
- [21] PTC University. *Introducción a Creo Parametric*. Arbortext, España, 2011.
- [22] Grupo Genia. *Resumen sobre Grafset*. Area de ingeniería de sistemas y automática, Universidad de Oviedo, España, 2001.