

## **Propuesta de una metodología de rebalanceo de líneas robotizadas de soldadura, en base a la transferencia de puntos (operario-robot), basado en los diagramas Yamazumi para el rebalanceo y equilibrado de líneas.**

**Carlos M. Dema<sup>1</sup>, Teresa Barberá<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Dpto. de Organización de Empresas. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Valencia. Universidad Politécnica de Valencia Camino de Vera s/n, 46022 Valencia. cmdema@doe.upv.es, mabarri@doe.upv.es.

### **Resumen**

*Los gráficos Yamazumi constituyen una herramienta fundamental a la hora de rebalancear operaciones en líneas de montaje. En la actualidad en todos los paneles de los monitores se encuentran las hojas de proceso de las operaciones del grupo junto a los yamazumis de todos los puestos, correspondiendo al equipo realizar los ajustes necesarios para optimizar la operación y equilibrar la carga de trabajo. Los continuos rebalanceos realizados en Trim y Chasis para adaptar las líneas a los cambios de la demanda, y con ello del Tack-time, implican una evolución de los procesos que si bien en las grandes líneas corresponden a Ingeniería de Planta los ajustes en línea son realizados por los propios operarios. Esta experiencia ha sido trasladada a la Planta de Carrocerías (Body) con la peculiaridad de que la mayor parte de las operaciones son realizadas por robots industriales, que carecen de la flexibilidad del operario, pero que aportan un gran potencial en cuanto a calidad y productividad. En la presente comunicación se aborda la transferencia operario-robot marcando siempre como objetivo la eliminación de los puestos manuales que todavía quedan en las líneas, apoyando la mejora en el exceso de capacidad que tienen las líneas robotizadas como consecuencia de que las interferencias geométricas limitan el aprovechamiento de los equipos.*

**Palabras clave:** Yamazumi, robots soldadura, rebalanceo y equilibrado de líneas.

### **1. Introducción**

#### **1.1. Propósito**

Desarrollar una primera herramienta que permita a los supervisores de línea y a los operarios MP realizar rebalanceos, trasladando puntos de soldadura entre robots, en celdas o en líneas robotizadas utilizando herramientas Lean, fundamentalmente los diagramas Yamazumi.

#### **1.2. Metodología**

Se ha procedido siguiendo la metodología “adaptativa o de exploración mixta” (Etzioni, 1973) analizando y resolviendo 10 oportunidades<sup>27</sup> en una línea robotizada de ensamblado y soldadura de suelos (underbody) en una planta de carrocerías del sector del automóvil.

#### **1.3. Aportaciones**

No se han encontrado herramientas similares en la bibliografía, aunque puedan existir herramientas similares en empresas del sector, como consecuencia de la aplicación generalizadas de las herramientas y de la filosofía Lean.

---

<sup>27</sup> Bajo la filosofía Lean se asume que un problema debe ser considerado como una oportunidad de mejora (Imai, 1983).

Se trasladan las herramientas habituales en los rebalances de las plantas de montaje y pintura al escalón anterior: la planta de carrocerías y estampación, lo que supone un avance en el desarrollo del Lean Management.

#### **1.4. Relevancia de las aportaciones**

Constituye un primer paso de crear herramientas Lean para estos problemas destinadas a los operarios MP y a sus supervisores.

Al rebalancear estas líneas robotizadas para equilibrarlas o simplificarlas se introduce la misma filosofía que en las plantas de Montaje/Assembly) y se utiliza la misma herramienta: los diagramas Yamazumi.

## **2. Introducción**

Las empresas, además de buscar aumentar su productividad, y como consecuencia su competitividad, también deben aumentar su adaptabilidad y flexibilidad. Lo que implica realizar un serio esfuerzo en implicar a sus RRHH en el proyecto común. La introducción y el desarrollo de una nueva organización laboral que sirva de apoyo a la mejora de la competitividad debe integrar los cambios en una estrategia global como consecuencia de que las prácticas de RRHH no tienen efectos aditivos (Becker y Gerhart, 1996). Kaizen es el término japonés para denominar la mejora continua en los procesos. Constituye uno de los pilares para los actuales esfuerzos en TQM y SIX-SIGMA así como el núcleo de los esfuerzos incrementales en estrategia y operaciones. En la mayor parte de las organizaciones, kaizen está en el corazón de la filosofía de la dirección y las intervenciones de cambio. La introducción del Kaizen o Mejora Continua en occidente se puede asociar a la publicación de “Kaze’n” de Imai (1991), y no se puede desligar del concepto de Lean Production acuñado por Womack et al. (1990) y difundido a partir de Monden (1993), Ohno (1993), Womack y Jones (1996) y Liker (2004). Es importante resaltar que la mejora continua (CI) puede ser considerada un ejemplo de lo que muchos teóricos de la estrategia llaman “capacidad dinámica” (Teece & Pisano, 1994) (Bessant, Francis, 1999).

Los resultados que se han obtenido en muchos casos justifican el desarrollo que ha tenido este nuevo enfoque para abordar la gestión empresarial, así, la experiencia de “TBM Consulting Group”, consultora de programas kaizen en un gran número de empresas, como resultados medios de sus acciones indica que:

- El 61% incrementaron su cuota de mercado.
- El 63% redujeron su tiempo de entrega.
- El 39% redujeron el tiempo necesario para el lanzamiento de un nuevo producto.
- El 24% incrementaron su línea de producto.
- El 63% mantuvieron o redujeron sus precios.
- El 92% de todas las compañías que desarrollaron programas basados en el tiempo garantizaron a sus empleados que no se producirían despidos ni reducciones como consecuencia de la mejora de la productividad. (Oakerson, 1997)

## **3. La problemática inherente a las líneas robotizadas**

Actualmente el robot industrial forma parte de los procesos de las empresas de gran cantidad de sectores industriales, en muchos casos formando células aisladas dentro de un sistema de producción tradicional. En los últimos años los robots han pasado de realizar algunas operaciones de soldadura y manipulación a ser el elemento clave de operaciones completas, o, incluso de plantas enteras. Así, actualmente la colocación de cristales en los vehículos

(Assembly Plant), la medición, punto a punto de toda la carrocería, el pintado de gran parte del vehículo, la introducción de la batería o de los asientos en el vehículo, y otras muchas son habitualmente realizadas por robots industriales. Sin embargo, donde los robots han alcanzado un mayor desarrollo ha sido en las plantas de carrocerías. En los últimos años hemos asistido al proceso de automatización total de las plantas en donde los operarios han pasado a tener funciones de control, mantenimiento y calidad. En 1975 en la planta FORD de Almussafes se introdujeron los primeros robots dedicados a operaciones de soldadura, mientras que la mayoría de las operaciones se basaban en estaciones de soldadura, actualmente las dos plantas de la Factoría: Body 1 y Body 2 se encuentran prácticamente robotizadas integralmente en todos sus procesos. La mejora de métodos y procesos, la introducción tecnología tienen como contrapartida el enriquecimiento de los puestos de trabajo y se amplían las funciones realizadas por los operarios lo que implica un mayor nivel de exigencia y compromiso. Bajo la filosofía Lean el personal de planta (gemba) tiene un papel fundamental en la solución de los problemas y en el aumento de la eficiencia que se traducen en el incremento de la productividad. (Holbeche, 1998) El problema de la polivalencia radica en la formación y el entrenamiento específicos que son necesarios para desarrollar las habilidades y competencias que se precisan y que serán los cimientos de las capacidades para desarrollar las nuevas tareas con eficacia y eficiencia, además de desarrollar los proyectos de mejora continua bajo la filosofía Ford Production System. Así, en las Plantas de Carrocerías, se han formado operarios MP (Maintenance and Production) de forma que sean capaces de controlar el proceso, realizar el mantenimiento preventivo y el correctivo básico, así como el control estadístico del proceso. Para estos operarios y para sus supervisores se ha desarrollado la metodología.

Según las normas ISO un robot industrial es “un manipulador multifuncional reprogramable con varios grados de libertad, capaz de manipular cargas, piezas, herramientas o dispositivos especiales según trayectorias variables programadas para realizar tareas dispersas; un definición mas completa la tenemos en la IFR- (Internacional Federation of Robotics) “Una máquina de manipulación automática, programable y multifuncional con tres o más ejes que pueden posicionar y orientar materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales para la realización de trabajos diversos en las diferentes etapas de la producción industrial, ya sea en una posición fija o en movimiento” (Rentería y Rivas, 2000; 9 y sig)

Frente a los planteamientos de robots generalistas o universales la tendencia actual es la utilización de robots exclusivos para cada tipo de operación: manipulación, pintura, soldadura, et, en aras de optimizar coste, calidad y productividad. En todos los casos los beneficios de la utilización de robots industriales derivan de:

- Eliminación de condiciones peligrosas o mejora de las condiciones de trabajo.
- Incremento de la productividad.
- Reducción de costes.
- Mejora de la calidad de producción. (Rentería y Rivas, 2000; 5)

Por otro lado los avances en los lenguajes de programación de carácter universal y las normas como la UDI 2863, así como la integración del diseño asistido y los sistemas de control numérico junto con el desarrollo de los sistemas electro-mecánicos, y los programas de simulación facilitan los estudios previos: selección del robot, distribución de máquinas, depuración de trayectorias.... Generando importantes ahorros no solo el tiempo de diseño sino, fundamentalmente, el de la puesta a punto de la instalación mediante la programación off-line, es decir programando previamente y simulando.

Los criterios generales de aplicación de un robot industrial (Barrientos et al, 2005; 255-288)

vienen asociados a las condiciones del proceso y a siete características básicas:

- Resolución: Incremento mínimo de movimiento que puede generar la unidad de control.
- Precisión<sup>28</sup>: Diferencia entre el punto programado y la media de las posiciones realmente alcanzadas.
- Repetibilidad: Exactitud en la repetición de movimiento cuando se intenta acceder a un punto tipo. Se define como la diferencia de radio de las esferas que contienen todos los puntos alcanzados (+ 0,01 mm, + 1 mm)
- Campo de trabajo: volumen espacial dentro del cual el robot puede situar el extremo de su muñeca.
- Capacidad de carga: Peso máximo en Kg. que puede transportar o manejar el robot garantizando sus prestaciones y considerando la posición más desfavorable. Incluye la pieza más la herramienta o soporte. En el caso de una planta de carrocerías el peso del soporte suele ser mucho más relevante que el de la pieza en sí. Los valores más frecuentes van de 50 a 200 Kg.
- Velocidad. Se puede analizar articulación a articulación, o como la velocidad media de la punta de la herramienta. (Aproximadamente 135°/seg).
- Aceleración Es el factor relevante en los movimientos cortos, ya que los arranques y las paradas...

En el caso que nos ocupa, los robots de soldadura tienen una capacidad de carga mínima de entre 50 y 100 Kg y en muchos casos trabaja sobre piezas sujetas por utillajes automáticos o semiautomáticos dispuestos en mesas posicionadas con uno o dos ejes de giro que deberá ser también controlada por la unidad de control. En función de las dimensiones y del peso de las piezas, estas permanecerán fijas, siendo el robot el portador de la pieza de soldadura, o bien será el robot el que manipule la pieza, situándola entre los electrodos de la pinza estática.

El equipamiento de soldadura se compone de: controlador de soldadura, etapa de potencia, transformador, electrodos y sistema de refrigeración (transformador y etapa de potencia van en la pinza), Siendo dos los tipos de pinza habitualmente utilizados:

- Pinza tipo C. Un electrodo es fijo y el otro móvil. El fijo se utiliza para establecer contacto con una de las piezas.
- Pinza tipo X. Dos electrodos móviles. Al cerrarse cuando uno toca la pieza mientras que el segundo sigue moviéndose para completar el cierre.

Los factores a considerar en el proceso, que se detalla en el apartado siguiente, para comprobar la posible transferencia son los clásicos para la elección de pinza y utillaje (Rentería y Rivas, 2000; 202 y sig):

- Selección de la garra/pinza de soldadura: Material y naturaleza de la superficie, Geometría, Dimensiones, Posibles zonas/puntos de sujeción y Peso.
- Factores relativos al proceso: Precisión en el posicionamiento; Fuerzas a desarrollar. Dado el peso de la pieza y el punto de sujeción, las fuerzas a desarrollar dependerán de las características del movimiento de manipulación de la pieza; Cambios en la geometría/peso

---

<sup>28</sup> Los conceptos de resolución, precisión y repetibilidad se definen para la muñeca del robot y en la posición más favorable, es decir, con el brazo totalmente extendido y están influidas por variables como la longitud de las articulaciones del brazo, la carga manipulada (peso, volumen, dimensiones)

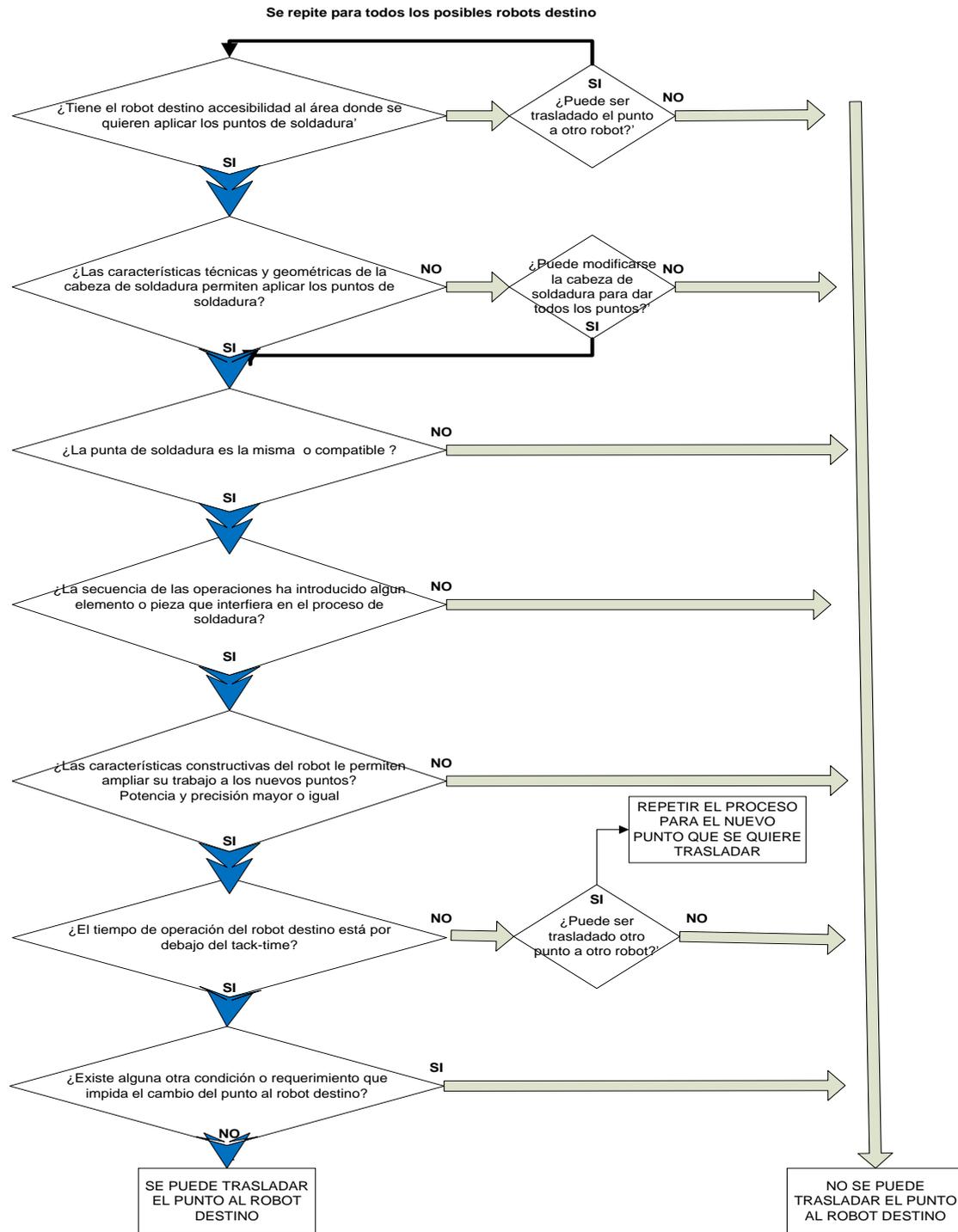
de las piezas debido al proceso; Suciedad sobre las piezas (grasa, limaduras,...); Tiempo de actuación.

En algunos casos resulta necesario dotar al robot de más de una garra/pinza para:

- Manipular diferentes piezas.
- Reducir el tiempo de ciclo.
- Permitir variaciones en la pieza.
- Realizar distintas operaciones en la misma pieza.

#### **4. Metodología propuesta**

La metodología propuesta se basa en una cadena de siete pasos en las que el operario va realizando las preguntas secuencialmente para analizar punto a punto si es posible o no traspasar el punto de soldadura analizado a un robot aguas arriba o aguas abajo del proceso. No se considera la posibilidad de traspasar punto del robot a los operarios por coste, ergonomía y calidad.



**Figura 1.** Metodología propuesta

## 5. Eliminar operario 1 del área Fender Aprons.

Se trata de eliminar una operación manual que se encuentra intercalada en la línea (Figura 1). El operario fija la pieza central sobre el soporte cerrando los resortes. A continuación el operario da manualmente los puntos guiando el conjunto de soldadura suspendido. Dado que no se incorporan elementos nuevos el robot anterior puede dejar la pieza en el soporte, que pasa a fijarse de forma automática, y el robot aplica todos los puntos de soldadura, y con las pinzas que se incorporan a la cabeza la traslada a la estación siguiente.



Figura 2. Estación manual.

Conforme se puede observar en las figuras 3 y 4 los robots de la estación están muy lejos de su carga de trabajo máxima y los operarios, sobre todo el 1, tiene una saturación elevada.

### LEFT APRON MANUAL YAMAZUMI - current state

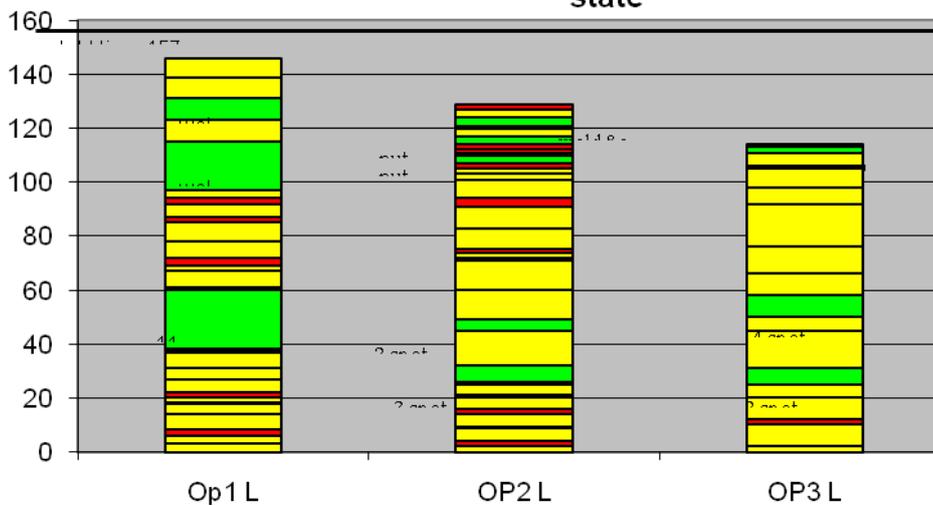


Figura 3. Yamazumi de los operarios antes de la mejora. Tack Time 157 sg.

### Apron robot's yamazumi - current state

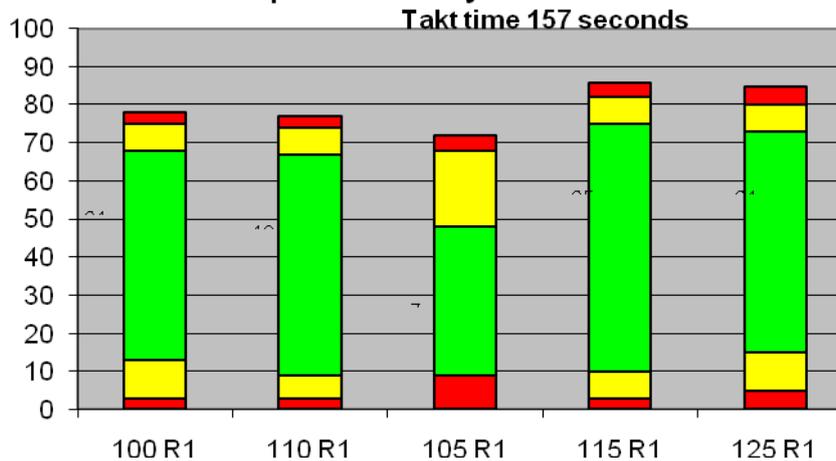


Figura 4. Yamazumi de los robots antes de la mejora. Tack Time 157 sg

Trabajo realizado por los operarios													
Área: Fender Aprons RH													
Operario	Número QPS	Estación	Ref. Maquina	Tipo Maquina	Operación que añade valor	Paneles y partes trabajadas o unidas	tipo de electrodo	VA (s)	ENVA (s)	NVA (s)	Número foto	Tiempo de ciclo (s)	
Op 1	JHBC02/001	Est.7	2_7-R1	PEW	3 Ptos. Sold.	Apr asy-frm ndr RH + Ret-Brk anti/Lk contr. Mod	FF16NOO	6	45	35	7	144	
		Est.10	2_10-R2	PEW	8 Ptos. Sold.	(Apr asy-frm ndr RH+Ret-Brk anti/Lk contr. Mod) + Brkt washer resvr mnt + Bracket engine mntg	FF16NOO	12	27	14	2, 5		
Op2	JHBC02/003	Est.20	2_20-R3	PEW	2 Ptos. Sold.	fender apron frm RH + Reinf frm ndr apron frm RH	FF16NOO	4	18	12	4	135	
			2_20-R3	PEW	3 Ptos. Sold.	fender apron frm RH+Reinf frm ndr apron frm RH]+ Reinf frm cross member lower	FF16NOO	5	51	39	6		
Op3	JHBC02/005	Est.100	2_40-R5	PEW	4 Ptos. Sold.	fender apron frm RH + Brkt pwr stng resvr	FF16NOO	7	32	25	8	134	
			Est.310	2_30-R4	PEW	6 Ptos. Sold.	fender apron frm RH + Hsg frm suspn mtg RH	FF16NOO	10	12	8	3	
						2 Ptos. Sold.	fender apron frm RH + Brkt asy-Lry mntg	FF16NOO	3	11	11	1	

Figura 5. Carga de trabajo de los operarios antes de la mejora. Tack Time 157 sg

La transferencia de puntos de soldadura operario-robot es una necesidad en cualquier proceso actual por dos motivos: la soldadura manual es un trabajo duro, con unas condiciones ergonómicas problemáticas a causa del peso y las inercias que se deben manejar a pesar de los sistemas de sustentación. Además, siempre pueden plantear problemas de calidad a causa del ángulo de las pinzas con la chapa, pues no se puede asegurar que el operario mantenga a lo largo del día un nivel cero defectos. No ha sido el caso, pero en un estudio posterior, es los casos de transferencia operio-robot se suelen eliminar puntos reposicionando otros ya que se asegura el posicionado y el tiempo de operación.

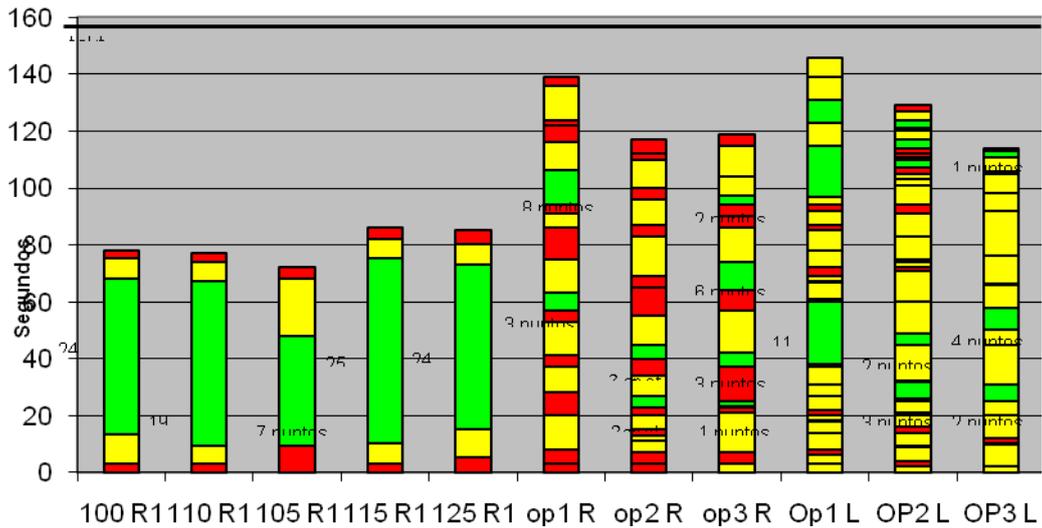
Trabajo realizado por los robots																	
Área: Fender Aprons																	
Estación	Robot	tipo de robot	Serial del robot	N. ptos. Sold.	Aplicación	tipo de cabeza	referencia de la cabeza	Largo del brazo de cabeza (mm)	Tipo de adaptador del electrodo	Tipo de electrodo	Paneles y piezas soldadas o unidas	VA (s)	ENVA (s)	NVA (s)	Número de foto	Tiempo de ciclo (s)	"trabaja con"
100	R1	UX120	781	24	Manejo//solda dura en sold. fijo	Pinza	V99 8236 000E	500	uwd 002-02162 uwd 00261884	FF16NOO	Aplicación de puntos de soldadura	55	17	6	2	78	Mesa de carga Mesa interoperacional Soldador fijo
110	R1	UX120	779	19	Manejo//solda dura en sold. fijo	Pinza	V99 8236 000E	500	uwd 002-02162 uwd 00261884	FF16NOO	Aplicación de puntos de soldadura	58	13	6	4	77	Mesa interoperacional Soldador fijo
105	R1	UX200	182	7	Puntos sold./manejo	Pistola G//pinza	V99 8237 000E	823	uwd 002-026167 uwd 00261824	FF16NOO	Aplicación de puntos de soldadura	39	20	9	3	68	Mesa de carga Mesa interoperacional
115	R1	UX120	767	25	Manejo//solda dura en sold. fijo	Pinza	V99 8236 000E	500	uwd 002-02162 uwd 00261884	FF16NOO	Aplicación de puntos de soldadura	65	14	7	1	86	Mesa interoperacional Soldador fijo conveyor
125	R1	UX120	1825	24	Manejo//solda dura en sold. fijo	Pinza	V99 8236 000E	500	uwd 002-02162 uwd 00261884	FF16NOO	Aplicación de puntos de soldadura	58	17	10	5	85	Mesa interoperacional Soldador fijo conveyor

Referencia de la pinza:R01Z503

Figura 6. Carga de trabajo de los robots de la celda antes de la mejora. Tack Time 157 sg

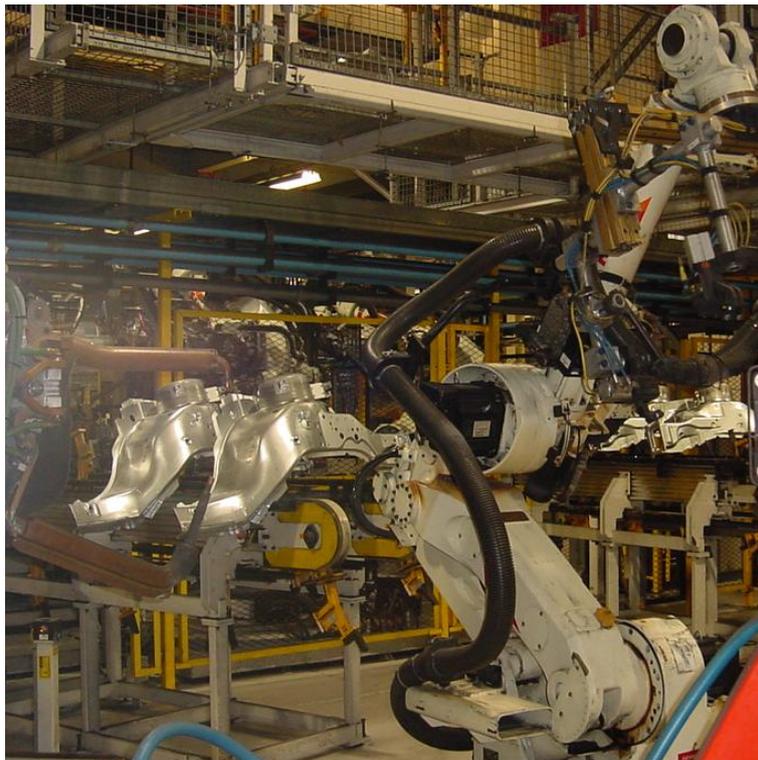
Tras la aplicación del proceso de transferencia de puntos se puede observar el efecto de la mejora al analizar los diagramas Yamazumi completos operarios-robots.

### Diagrama yamazumi - Fender apron RH - Situación actual

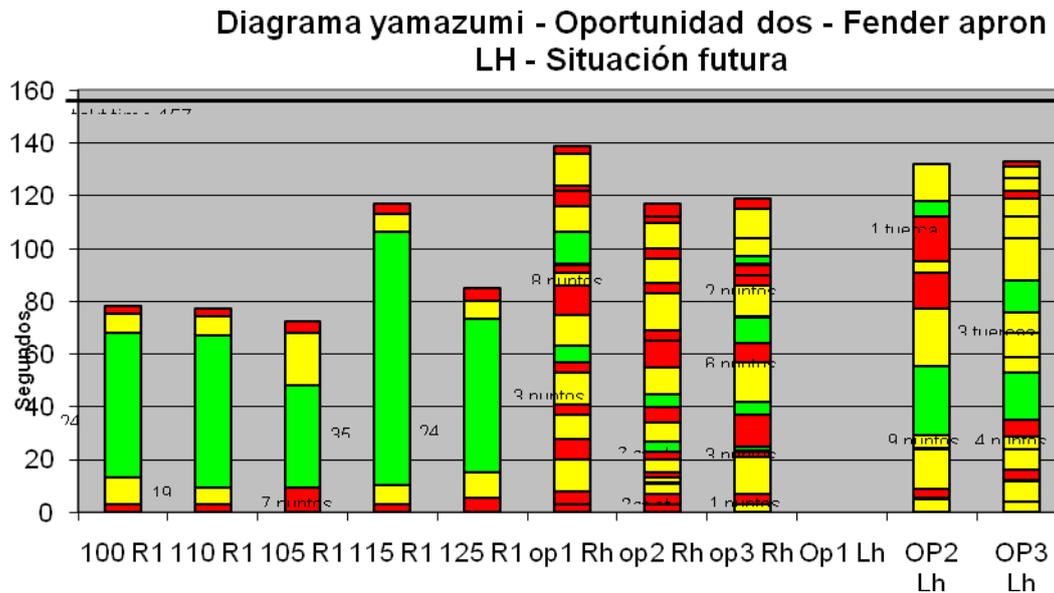


**Figura 7** Yamazumi operarios-robots antes de la mejora. Tack Time 157 sg

En el nuevo proceso el robot de la figura 8 aplica los puntos de soldadura, y pese a ello todavía queda muy lejos de su nivel de saturación. Las limitaciones relativas al campo util del robot implican que en muchos casos los niveles de saturación sean relativamente bajos. En otras situaciones, como el secuencado de llantas, se precisa una precisión menor y se puede colocar un eje adicional horizontal para ampliar el campo util, pero en el caso de soldadura la posibilidad toórica queda descartada a causa de los niveles de precisión y repetitividad necesarios.



**Figura 8.** Yamazumi de los operarios antes de la mejora. Tack Time 157 sg



**Figura 9.** Yamazumi de los operarios y de los robots después de la mejora. Tack Time 157 sg

Podemos ver en la figura 9 que el operario 1 del lado izquierdo ha sido eliminado y que el robot 115R1 ha aumentado su tiempo de ciclo considerablemente debido a la absorción del trabajo de la zona manual. También se pueden observar modificaciones en el trabajo que realizan los dos operarios que han quedado de la zona “Fender Aprons LH. Ahora se dispone de una nueva solución en la que se transfieren 10 puntos de soldadura y un nuevo lay out-process flow puesto que prescindimos de una estación manual de trabajo.

### Agradecimientos

A la Factoría Ford de Almussafes con la que mantenemos una relación de mas de 20 años de colaboración en temas de Estudio del Trabajo, Lean Management y Continuous Improvement (Kaizen) y a la planta de Jaguar Cars Limited de Halewood donde se ha realizado el proyecto final de carrera que sirve de base para el trabajo.

### Referencias

- Barrientos, A. et al. (2005). Fundamentos de robótica Ed. McGraw Hill.
- Bessant, Jh. & Francis, D. (1999). Developing strategic continuous improvement capability. International Journal of Operations Managemen. Vol. 19, No. 11, pp. 1106-1119.
- Nakamura, SH. (1993). The New Standardization Keystone of continuous Improvement in Manufacturing. Productivity Press.
- Oakerson, N, M. (1997). Makes Dollars & Sense for Mercedes-Benz in Brazil. IIE Solutions, April pp. 33-35.
- Remtería, A. y Rivas, M. (2.000). Robótica Industrial: Fundamentos y aplicaciones. EVE (Instituto Vasco de la Energía. Mc Graw-Hill e Iberdrola.
- Sprar, S.; Bowen, H.K. (1999). Decoding the DNA of the Toyota Production System Harvard Business Review, September-October, pp. 97-106
- Womak, J.P. y Jones, D.T. (2004). Lean Thinking. Como utilizar el pensamiento Lean para eliminar los despilfarros y crear valor en la empresa. ED. Gestión 2.000.