

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

**Fernando Oliete<sup>1</sup>, 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 robot-robot intentando eliminar robots para transferirlos a otras líneas o a otras plantas.*

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

## **12. Introducción**

### **12.1. 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.

### **12.2. Metodología**

Se ha procedido siguiendo la metodología “adaptativa o de exploración mixta” (Etzioni, 1973) analizando y resolviendo 10 oportunidades<sup>29</sup> en una línea robotizada de ensamblado y soldadura de suelos (underbody) en una planta de carrocerías del sector del automóvil.

### **12.3. 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>29</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.

#### **12.4. 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.

#### **13. Los gráficos Yamazumi en el contexto del C.I. y del Lean Management.**

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; una definición más 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>30</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>30</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 cielo; 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.

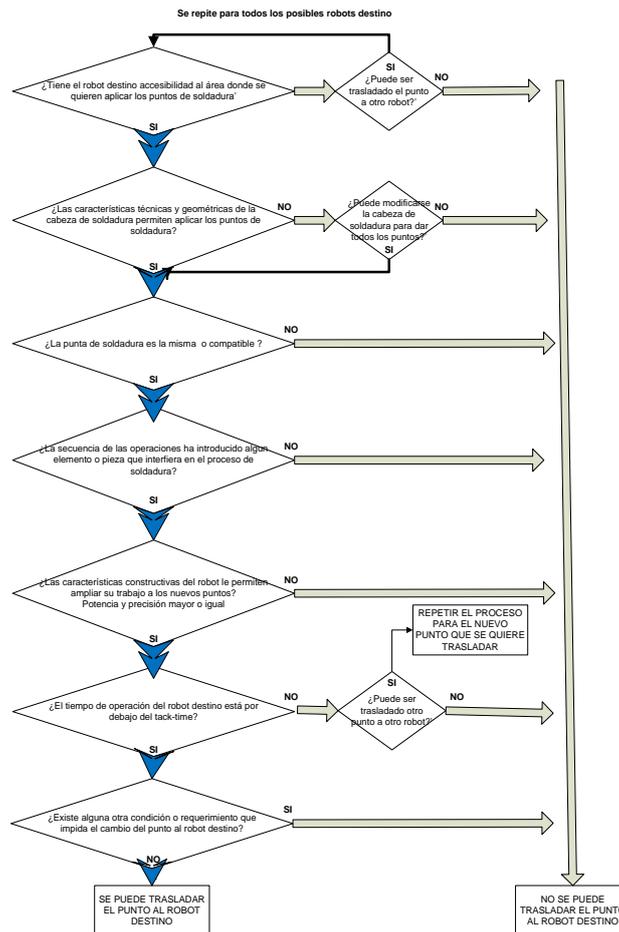


Figura 1. Metodología propuesta

#### 5. Eliminar los robots 400R1 y 410R2 del área Front.

Como podemos ver en sus correspondientes informes de secuencia, el robot 400R1, dotado de pistola de soldar, realiza únicamente trabajo de soldadura y el robot 410R1, dotado de pinza y soldador fijo, realiza trabajo de soldadura y coloca la pieza en otra estación manual (Figura 2).

Para poder realizar la mejora será preciso modificar el lay-out. En primer lugar, será necesario cambiar la mesa de carga manual y soldadura automática de la estación 420 por una nueva, añadiéndole los anclajes propios de la estación 400. Con esta nueva mesa, el operario podrá

colocar todas las piezas correspondientes a las mesas de carga 400 y 420 en la estación 420 y así empezar el proceso de fabricación de esta zona a partir de esta mesa de carga manual.

Trabajo realizado por los robots											
Área: Rear Floor											
Estación	Robot	tipo de robot	N. ptos. Sold.	Aplicación	tipo de cabeza	referencia de la cabeza	Largo del brazo de cabeza (mm)	Tipo de electrodo	Paneles y piezas soldadas o unidas	Tiempo de ciclo	"trabaja con"
100	R1	ux120	17	Puntos sold.	Pistola de tijeras	v007207000E	300	FF16NOO	(Reinf floor side member + Member floor side R)+ Abs assy bmpr RR + Member Floor side Rear Rh	54	Mesa de soldadura y carga
105	R1	ux120	17	Puntos sold.	Pistola de tijeras	v007206000E	300	FF16NOO	(Reinf floor side member + Member floor side L)+ Abs assy bmpr RR LH+ Member Floor side Rear Lh	54	Mesa de soldadura y carga
110	R1	ux150	12	Puntos sold./manejo	Pistola de tijeras//pinza	v007202000E	400	FF20NOO	Ret asy flr s/m RR + Ret asy flr s/m to frt + M12 Nut	63	Mesa de soldadura y carga
115	R1	ux150	12	Puntos sold./manejo	Pistola de tijeras//pinza	v007203000E	400	FF20NOO	Ret asy flr s/m RR + Ret asy flr s/m RR to frt s/m + M12 Nut	68	mesa de soldadura
120	R1	ux120	22	Manejo/soldadura en sold. fijo	Pinza	v007397000E	550	FF16NOO	Aplicación de puntos de soldadura	74	mesa de carga soldador fijo
125	R1	ux120	22	Manejo/soldadura en sold. fijo	Pinza	v007398000E	550	FF16NOO	Aplicación de puntos de soldadura	81	mesa de carga soldador fijo
130	R1	ux150	0	manejo	Pinza					43	mesa de carga mesa interoperacional
140	R1	ux120	17	Puntos sold.	Pistola de tijeras	v007205000E	370	FF16NOO	Aplicación de puntos de soldadura	56	mesa de soldadura
	R2	ux120	17	Puntos sold.	Pistola de tijeras	v007204000E	370	FF16NOO	Aplicación de puntos de soldadura	56	mesa de soldadura
150	R1	ux150	22	Manejo/soldadura en sold. fijo	gripper	v007399000E	400	FF16NOO	Aplicación de puntos de soldadura	81	mesa de carga soldador fijo
160	R1	ux120	22	Puntos sold.	Pistola de tijeras	v007201000E	400	FF20NOO	Aplicación de puntos de soldadura	65	mesa de soldadura
	R2	ux120	22	Puntos sold.	Pistola de tijeras	v007200000E	400	FF20NOO	Aplicación de puntos de soldadura	65	mesa de soldadura
165	R1	ux150	22	Manejo/soldadura en sold. fijo	Pinza	v007420000E	400	FF16NOO	Aplicación de puntos de soldadura	76	mesa interoperacional soldador fijo
	R2	ux120	2	Maquina de pegamento	pistola de pegamento				Aplicación de lineas de pegamento	30	mesa interoperacional
170	R1	ux150	12	Manejo/soldadura en sold. fijo	Pinza	v007421000E	500	FF20NOO	Aplicación de puntos de soldadura	65	soldador fijo
400	R1	ux120	13	Puntos sold.	Pistola de tijeras	V007208000E	700	FF16NOO	Pan RR Flr Frt + Fill assy Spre Whl WI Pnl + Reinf asy RR Flr pnl + Reinf RR seat back to w/house Rh	44	mesa de carga
410	R1	ux120	13	Manejo/soldadura en sold. fijo	Pinza	V007424000E	700	FF16NOO	Aplicación de puntos de soldadura	56	mesa de carga
420	R1	ux120	8	Puntos sold.	Pistola de tijeras	V007209000E	700	FF16NOO	+ Reinf asy Frt seat Belt An + Reinf RR seat back Flr + Reinf RR seat back to w/house Lh + Retainer RR seat cushion ctr	45	mesa de carga

Figura 2. Datos básicos del proceso

El robot 420R1, dotado de pistola de soldar, aplicará los puntos de soldadura correspondientes al robot 400R1 y los suyos propios en la nueva mesa de carga y soldadura de la estación 420.

El robot 430R1, dotado de pinza y soldador fijo, aplicará los puntos de soldadura correspondientes al robot 410R1 y los suyos propios en su soldador fijo. En primer lugar recogerá la pieza en la mesa de la estación 420 cuando el robot 420R1 haya acabado de realizar su trabajo, después aplicará los puntos de soldadura y seguidamente colocará la pieza en la mesa de soldadura de la estación 440. No existe ninguna interferencia ni ningún panel añadido que represente un obstáculo para que el robot 420R1 pueda aplicar los puntos de soldadura que corresponden actualmente al trabajo del robot 400R1. El robot 400R1 es del modelo UX120 y el robot 420R1 es del modelo UX120, no habrá ningún problema atendiendo a las características del robot.

El robot 400R1 tarda 44 segundos en realizar todo su trabajo y el 420R1 tarda 45 segundos. Suponiendo que el robot 190R1 realice todo el trabajo de ambos, tendrá que aplicar 21 puntos de soldadura a la pieza en la nueva mesa de carga manual y soldadura automática de la estación 420, por ello la suma de ambos tiempos:  $44 + 45 \text{ segundos} = 89 \text{ segundos} < 157 \text{ segundos}$  que es nuestro límite máximo Takt time. La accesibilidad no es un problema ya que el método de aplicación de puntos de soldadura se da mediante un robot con pinza y un soldador fijo, característica propia de robots con accesibilidad total, tenemos una clara accesibilidad en toda la pieza:

- El soldador fijo del robot 410R1 posee una longitud de brazos igual (700 mm.) a la del soldador fijo del robot 430R1.
- Los robots 410R1 y 430R1 utilizan soldadores fijos con pistola tipo “X”, por lo que existe compatibilidad.
- Podemos observar la facilidad de aplicación de los puntos de soldadura que aplica el robot 410R1 por lo que no resultara un problema para el robot 430R1 aplicar dichos puntos de soldadura.

No existe ninguna interferencia ni ningún panel añadido que represente un obstáculo para que el robot 430R1 pueda aplicar los puntos de soldadura que corresponden actualmente al trabajo del robot 410R1. Esto se debe a la nueva situación en la que los paneles colocados actualmente en las mesas de carga de las estaciones 400 y 420 no se superponen uno a otro, por lo que no se da la necesidad de establecer un orden a la hora de construir la pieza.

Dado que el robot 430R1 es del modelo UX150 y el robot 410R1 es del modelo UX120, no habrá ningún problema atendiendo a las características del robot.

El robot 410R1 tarda 56 segundos en realizar todo su trabajo, el robot 430R1 tarda 70 segundos.

Suponiendo que el robot 430R1 realice todo el trabajo de ambos, tendrá que aplicar 13 puntos de soldadura extra, lo que hace un total de 32 puntos de soldadura, y dejar la pieza en la mesa inter-operacional de la estación 440.

En el que podría llamarse peor caso, el tiempo máximo que tardaría el robot en realizar todo ese trabajo, sería la suma de ambos tiempos:  $56 + 70 \text{ segundos} = 126 \text{ segundos} < 157 \text{ segundos}$  que es nuestro límite máximo Takt time.

La nueva secuencia que seguirá el robot 420R1 será la siguiente:

- 1.- Esperar a que el operario coloque todas las piezas en la nueva mesa de fijación para la carga manual y soldadura automática.
- 2.- Moverse hasta dicha mesa y comenzar a soldar las piezas.
- 3.- Aplicar los nuevos 21 puntos de soldadura.

4.- Retirarse y dejar paso al robot 430R1

La nueva secuencia que seguirá el robot 430R1 será la siguiente:

- 1.- Esperar a que el robot 420R1 acabe su nuevo trabajo en la estación 420.
- 2.- Moverse hasta dicha mesa y coger la pieza.
- 3.- Moverse hasta el soldador fijo y aplicar los 32 puntos de soldadura que ahora le corresponden.
- 4.- Moverse hasta la mesa de carga y soldadura automática 440 y colocar allí la pieza trabajada hasta el momento.

La zona manual se verá afectada, y esto se manifiesta en el nuevo trabajo del operario. El nuevo trabajo que realizara el operario será el siguiente:

- 1.- Cargar los conveyors 440, 210L y 210R.
- 2.- Cargar la nueva mesa de la estación 420 con el resto de las piezas pertinentes.

El nuevo trabajo del “operario 4” es muy parecido al anterior, pero con esta nueva secuencia, el operario tendrá que andar menos ya que ahora solo cargara una mesa. Además, ya no tendrá que perder tiempo esperando a que dos de los cuatro robots que afectaban su trabajo, terminen de trabajar y dar paso al siguiente ciclo.

Todos estos ahorros no representan otra cosa más que un considerable ahorro de tiempo en el operario que podrá ser utilizado para que este realice otros trabajos.

Como se puede observar la carga de los robots del área está muy por debajo del tack-time, por lo que existe una clara oportunidad para eliminar alguno de ellos:

Diagrama Yamazumi - Rear Floor - Situación actual

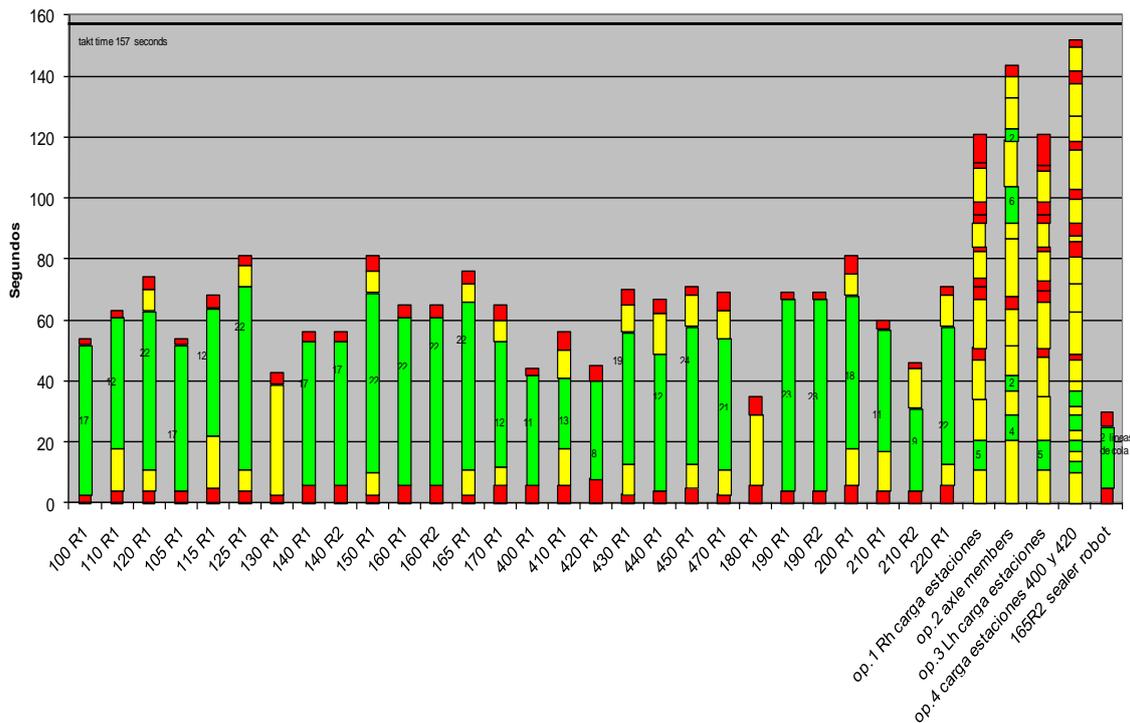


Figura 3. Yamazumis del área en las condiciones iniciales. Tack time 157 seg.

Diagrama Yamazumi - Rear floor - Oportunidad tres - Situación futura

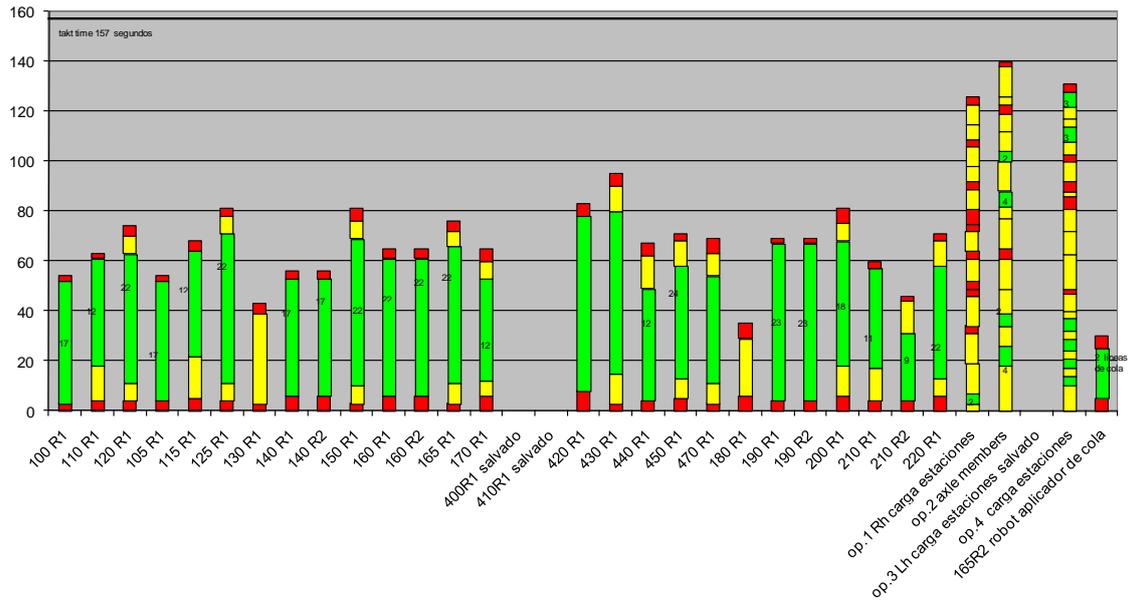


Figura 4. Opción tres para la mejora. Tack Time 157 sg

Se desarrollaron tres opciones de mejora siendo la más completa la tres en la que se eliminan dos robots.

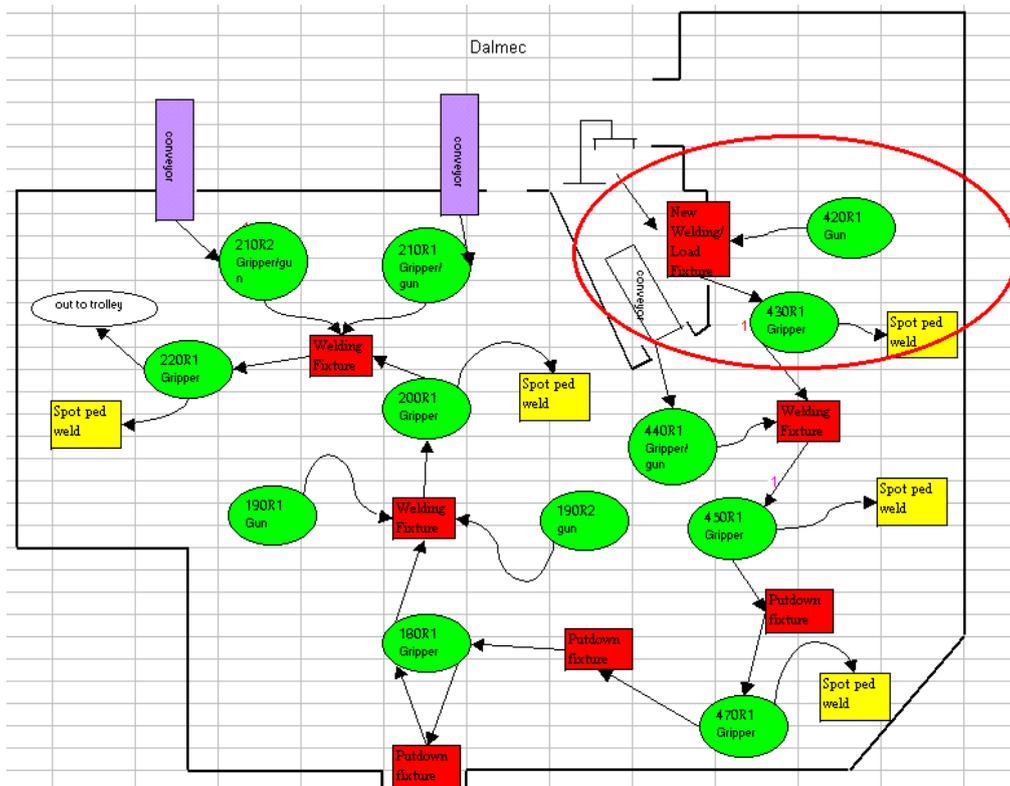


Figura 5. Esquema normalizado

Podemos observar los cambios en este nuevo diagrama lay out process flow donde se sitúa la circunferencia roja. Vemos que han desaparecido los robots 400R1 y 410R1.

Para el nuevo proceso el diagrama lay out-process flow de la zona manual queda de la siguiente forma:

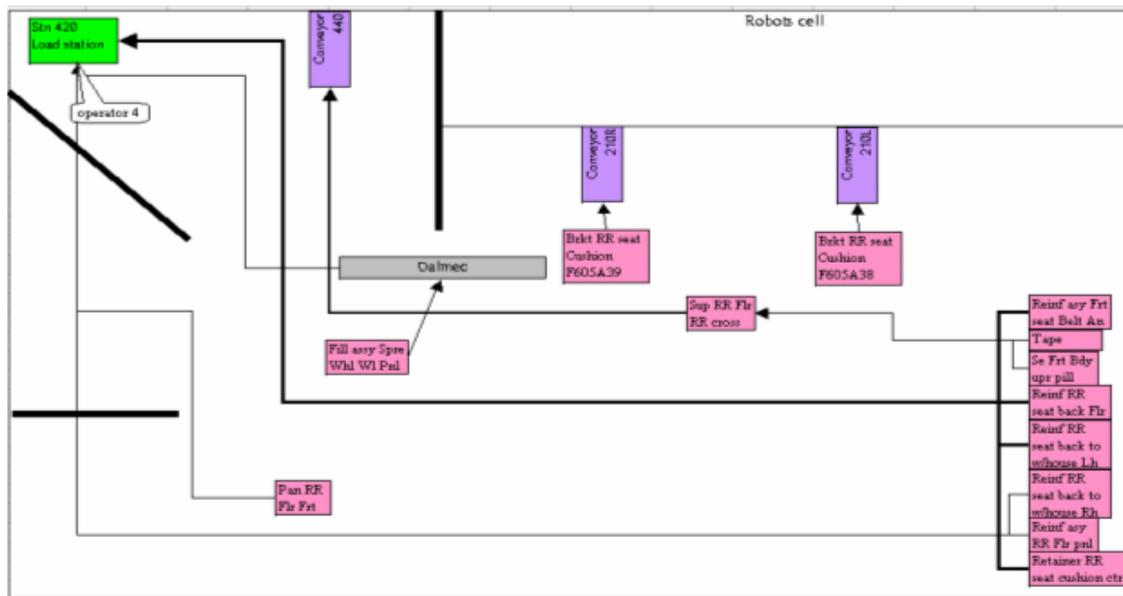


Figura 6. Opción tres para la mejora. Tack Time 157 sg

Podemos observar los cambios en este nuevo diagrama lay out process flow, la estación 400 ha desaparecido y ha habido una reinstalación de la maquina Dalmec.

### 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 un proyecto final de carrera.

### Referencias

- Bessant, Jh. y Francis, D. (1999). Developing strategic continuous improvement capability". International Journal of Operations management. 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.
- 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.