



# UNIVERSIDAD DE OVIEDO

DEPARTAMENTO DE EXPLOTACIÓN Y PROSPECCIÓN DE MINAS

MÁSTER INTERUNIVERSITARIO EN DIRECCIÓN DE PROYECTOS

TRABAJO FIN DE MÁSTER

## Diseño de un sistema de arranque de línea en una planta de componentes de automoción

Autor: Isabel Chong Cheung

Director: José Manuel Mesa Fernández

Codirector: Eliseo Vergara González

Fecha: 08/07/2019

## **Agradecimientos**

En primer lugar, agradecer a los tutores del presente Trabajo Fin de Máster, su guía y su apoyo en la realización de este.

Cursar este Máster no hubiese sido viable sin las facilidades dadas por PMG Asturias Powder Metal para compaginar los horarios lectivos y laborales, su ética de trabajo ha sido una gran fuente de inspiración.

También tienen un lugar importante en esta mención todos los compañeros de élite que he conocido este año académico, un equipo excelente de alto rendimiento.

No puede faltar tampoco una mención a los profesores del Máster Universitario en Dirección de Proyectos cuya entrega ha hecho de este Máster una experiencia enriquecedora.

Y finalmente, dar las gracias a familiares y amigos por su incondicional apoyo y ánimo.

## **Contenido**

1. Introducción .....	1
2. Objetivos .....	6
3. Justificación .....	8
4. Sistema de Arranque de Línea Inicial .....	13
5. Estado del Arte .....	29
5.1. Análisis Crítico .....	36
6. Metodología .....	43
7. Sistema de Arranque Propuesto – “Arranque Rápido” .....	47
8. Validación .....	62
9. Conclusiones .....	64
10. Líneas Futuras de Investigación .....	66
11. Bibliografía y Referencias .....	67

## **Ilustraciones**

Ilustración 1 – Ventas mundiales de coches de 1990 a 2019 (en unidades de millón) (The Statistics Portal, 2019).....	1
Ilustración 2 - Línea de producción de Toyota (Somos Toyota, 2017). .....	2
Ilustración 3 - Factores del OEE (“OEE (Overall Equipment Effectiveness),” 2016) .....	4
Ilustración 4 – Mecanismo de ajuste (Gungor and Evans, 2015). .....	6
Ilustración 5 - Tipos de paradas .....	10
Ilustración 6 - TOP 3 de paradas por proceso.....	11
Ilustración 7 - Proceso productivo de la línea de fabricación .....	13
Ilustración 8 - Flujograma de tareas de un proceso completo de arranque.....	14
Ilustración 9 - Flujograma de tareas de un proceso parcial de arranque.....	15
Ilustración 10 - Cronograma de arranque de línea - completo .....	16
Ilustración 11 - Cronograma de arranque de línea - vaciado y proceso 1 .....	17
Ilustración 12 - Cronograma de arranque de línea - proceso 2 .....	19
Ilustración 13 - Cronograma de arranque de línea - proceso 3 .....	19
Ilustración 14 - Cronograma de arranque de línea - proceso 4 .....	20
Ilustración 15 - Cronograma de arranque de línea - arranque continuo .....	21
Ilustración 16 - Cronograma de arranque de línea - tiempo total .....	22
Ilustración 17 - Ciclo de control del proceso 1 .....	23
Ilustración 18 - Ciclo de control del proceso 2.....	24
Ilustración 19 - Ciclo de control del proceso 3.....	25
Ilustración 20 - Ciclo de control del proceso 4.....	26
Ilustración 21 - Ciclo de control del proceso 5.....	27
Ilustración 22 – Método SMED (Kemal Karasu et al., 2014). .....	29
Ilustración 23 – Distribución de las publicaciones consideradas en el intervalo de tiempo definido (Godina et al., 2018). .....	30

Ilustración 24 – Progreso del tiempo de ajuste (Kemal Karasu et al., 2014). ...	32
Ilustración 25 – Algoritmo de fijación de posiciones (Sioud et al., 2012).....	33
Ilustración 26 – Algoritmo EMBO propuesto (Sioud and Gagné, 2018) .....	34
Ilustración 27 – Las cuatro revoluciones industriales (Vaidya et al., 2018). ....	34
Ilustración 28 - Fases del método Delphi (University of Phoenix Research Hub, s.f.) .....	43
Ilustración 29 - Fases de la metodología propuesta.....	45
Ilustración 30 - Piezas para el arranque de línea .....	46
Ilustración 31 - Ciclo de control propuesto del proceso 1 .....	47
Ilustración 32 - Ciclo de control propuesto del proceso 2.....	48
Ilustración 33 - Ciclo de control propuesto del proceso 3.....	49
Ilustración 34 - Ciclo de control propuesto del proceso 4.....	50
Ilustración 35 - Ciclo de control propuesto del proceso 5.....	51
Ilustración 36 - Base de datos propuesta en OneNote para gestión de arranques .....	54
Ilustración 37 – Ejemplo de página de arranque en proceso .....	55
Ilustración 38 - Cronograma de arranque rápido de línea (propuesta) - completo .....	56
Ilustración 39 - Cronograma de arranque rápido de línea (propuesta) - proceso 1 .....	57
Ilustración 40 - Cronograma de arranque rápido de línea (propuesta) - proceso 2 .....	58
Ilustración 41 - Cronograma de arranque rápido de línea (propuesta) - proceso 3 .....	59
Ilustración 42 - Cronograma de arranque rápido de línea (propuesta) - proceso 4 .....	60
Ilustración 43 - Cronograma de arranque rápido de línea (propuesta) - proceso 5 .....	60



Ilustración 44 - Cronograma de arranque rápido de línea (propuesta) - tiempo total .....	61
Ilustración 45 - Validación de metodología y sistema propuestos .....	62

## **Tablas**

Tabla 1 - Características totales de los ciclos de control por proceso.....	28
Tabla 2 - Análisis crítico del estado del arte.....	36
Tabla 4 - Características totales de los ciclos de control por preserie y avanzadilla .....	52

## **Ecuaciones**

Ecuación 1 - Coste total de paradas no programadas con un 65% de disponibilidad.....	11
Ecuación 2 - Coste total de paradas no programadas con un 83% de disponibilidad.....	63



## 1. Introducción

En los últimos 20 años se han vendido alrededor de 300 millones de coches (The Statistics Portal, 2019) a nivel mundial. En la ilustración 1 se puede ver el crecimiento de ventas de la última década y la previsión de ventas de 78.7 millones de coches para 2019.

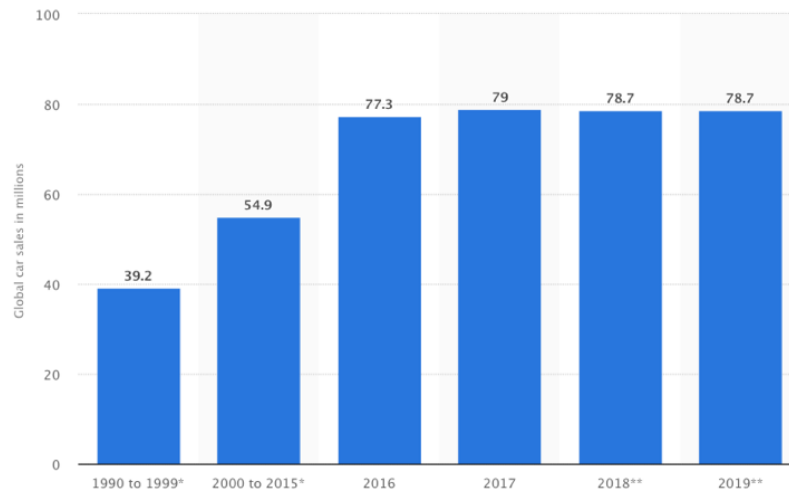


Ilustración 1 – Ventas mundiales de coches de 1990 a 2019 (en unidades de millón) (The Statistics Portal, 2019).

El sector de la automoción representa el 10% del PIB de España y el 19% de las exportaciones totales de este país. Además, crea más de 300.000 puestos de trabajo directos y alrededor de 2 millones más de forma indirecta. Dentro de este sector cabe destacar una potente industria dedicada a los diferentes componentes que forman un automóvil. Existen más de 1.000 empresas fabricantes de Equipos y Componentes (ICEX, 2018).

El gran referente de la producción de automóviles es la marca Toyota que desarrolló el *Toyota Production System (TPS)* (Somos Toyota, 2017). Desde 1902, con la “*eliminación completa de todos los residuos*” (Somos Toyota, 2017) han sido pioneros en metodologías y en mejoras de fabricación.

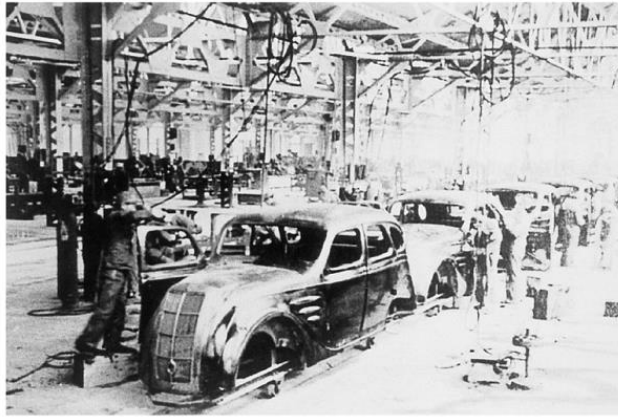


Ilustración 2 - Línea de producción de Toyota (Somos Toyota, 2017).

Los pilares de su sistema productivo (Somos Toyota, 2017) se basan en:

1. *Just in time (JIT)*: fabricar lo justo y necesario en el momento en que se necesita para reducir stock innecesario.
2. *Jidoka*: automatización de líneas continuas de máquinas supervisadas por personas.
3. *Kaizen*: filosofía de producción basada en la mejora continua para impulsar la calidad.

Las ventajas de este sistema son muchas, y entre ellas destaca la gran flexibilidad con la que cuentan sus líneas de fabricación. Son capaces de adaptarse rápidamente de un producto a otro con unos pocos cambios en los distintos pasos de proceso que conforman la línea completa.

En un mercado tan cambiante cómo el actual las empresas deben reinventarse continuamente y ser competitivas. Para ello focalizan sus esfuerzos en continuas mejoras productivas que los hagan sobresalir con respecto a sus competidores ofreciendo un producto de mayor calidad al menor coste posible. Para conseguir esta reducción en los costes, las empresas que conforman la cadena de suministros del automóvil buscan mejorar sus instalaciones (ya amortizadas) para poder producir cantidades mayores.

Existen dos vías principales por las cuales una empresa fabricante de componentes de automoción puede ampliar su capacidad productiva. Mediante:

1. La ampliación de sus instalaciones

En este caso una gran inversión de capital es necesaria. Si no fuera necesaria la adquisición de nuevos terrenos se necesita por lo menos una ampliación de nave o una nueva construcción (con la correspondiente maquinaria). En el primero se necesitaría remodelar la fábrica actual para adaptarla a la nueva situación y en el segundo caso se edificaría una nave entera. Todo esto conlleva una inversión importante que a menudo tiene que ser justificada ante los inversores con la obtención de nuevos contratos con clientes. Se trata de una tarea de larga duración y muy costosa.

## 2. El incremento de OEE

El OEE (*Overall Equipment Effectiveness*) es un indicador que se utiliza mucho en los procesos de manufactura. Mide la productividad y eficiencia de los procesos productivos (“OEE (Overall Equipment Effectiveness),” 2016).

Para ello se basa en 3 factores:

- Disponibilidad: tiempo de funcionamiento real de una máquina. Se tiene en cuenta las paradas por averías, por mantenimientos programados, de esperas por otras máquinas, etc.
- Rendimiento: mide la capacidad productiva real de un sistema. Se ve influenciado por las micro paradas y la velocidad reducida.
- Calidad: se trata de la cantidad de producto ok que produce la línea ya que es el cociente entre lo que llega al final de la línea (empaquetado) entre lo que se produce en el primer paso de proceso. Mide la cantidad de rechazos y retrabajos.

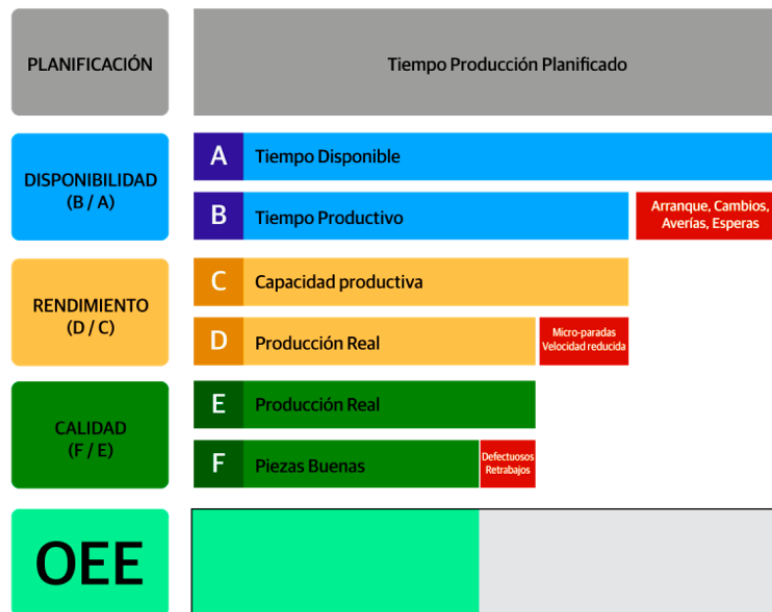


Ilustración 3 - Factores del OEE (“OEE (Overall Equipment Effectiveness),” 2016)

El OEE se calcula como el producto de estos 3 factores y nos indica cómo de eficiente es nuestro sistema productivo.

En un sector tan cambiante como el del automóvil, la demanda de productos es tan variada y personalizada que cada día es más complicado hacer previsiones de las planificaciones de lotes productivos. Un producto establecido en serie en una fábrica puede sufrir peticiones de cambio por parte del cliente (marca de coche o proveedor directo de un OEM) o incluso pasar a ser obsoleto en cuestión de un día. Cambios menores como reducciones o ampliaciones en la cantidad de pedidos ocurren también con frecuencia. Una de las formas en las que todas las empresas de componentes intentan mejorar su disponibilidad y capacidad es en mejorar sus cambios de referencias (debido a la gran variedad de productos disponibles y con un afán de obtener mayor versatilidad para atraer nuevos clientes potenciales y por tanto aumentar su volumen de productos) y arranques de líneas productivas.

Dentro de la línea de producción es necesario hacer adaptaciones a las máquinas cuando se va a cambiar de un producto (referencia) a otro, esto es lo que se denomina arranque de línea.

Un arranque de línea es el conjunto de operaciones que es necesario llevar a cabo en las distintas máquinas y procesos que conforman la línea de producción para poder pasar de fabricar un producto “A” a un producto “B”. Dichos productos

serán similares, pero requerirán de utillajes específicos como, por ejemplo, cambio de matriceria, cambio de plaquitas de corte, máquinas de control con utillajes hechos a medida, etc. También se incluyen operaciones dedicadas al orden y limpieza. Todas estas operaciones conllevan tiempos de parada de línea que disminuyen la disponibilidad tanto del propio proceso como de la línea en general.

Un sistema de arranque de línea bien definido puede suponer una gran diferencia en el factor de disponibilidad del OEE. A mayor disponibilidad, mayor OEE y por tanto mayor eficiente será la línea productiva y mayores beneficios se podrán sacar.

En este documento se estudia una empresa del sector de la automoción que pertenece a la cadena de suministros del coche como fabricante Tier 1, suministrador directo de marcas de coches.

En primer lugar, se definen los objetivos a conseguir y se justifica la necesidad de realizar la investigación. Posteriormente, se describe un sistema de arranque de línea como punto de partida.

Tras tener el planteamiento del problema se realiza un estudio de la técnica actual. En el que se identifican y evalúan las metodologías existentes de aplicación en este campo.

Luego se desarrolla una metodología y un sistema de arranque optimizado que permita mejorar la disponibilidad de la línea productiva.

Y finalmente, tras las conclusiones obtenidas, se reflejan las líneas de investigación que se han identificado para posibles futuros estudios.

## 2. Objetivos

El objetivo principal de este documento es diseñar un sistema de arranque de línea optimizado para una empresa fabricante de componentes del automóvil por pulvimetalurgia (Tier 1, suministrador directo de un OEM) cuyo proceso se basa en la producción continua por lotes.

Se realizará un estudio de los métodos actuales disponibles para la optimización de tiempos de arranque (*changeover time*) para diseñar un sistema de arranque personalizado para dicha empresa que cuenta, entre otras, con una línea de producción automatizada compuesta por:

- 5 pasos de proceso con diferentes máquinas (prensas, hornos, centros de mecanizado, máquinas térmicas y de acabado superficial).
- Operaciones diferentes en cada paso de proceso que requieren unos ajustes de máquina particulares.
- Múltiples operarios encargados de los ajustes, mantenimientos y supervisión de máquinas. Están divididos por fase de proceso.
- Ajuste de línea en cascada dependiente de estado de producto (calidad) y orden en la línea.

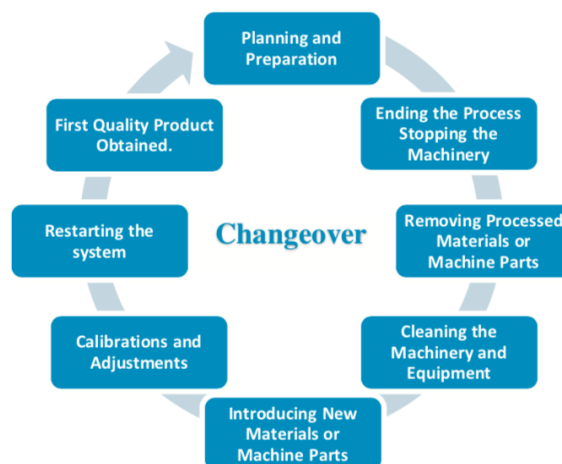


Ilustración 4 – Mecanismo de ajuste (Gungor and Evans, 2015).

Mediante la disminución de tiempos de arranque se pretende mejorar la disponibilidad de la línea de producción para aumentar la capacidad productiva de dicha línea y poder ampliar su producción anual.

Además, se buscará alcanzar los siguientes objetivos secundarios:



**Objetivos**

- Arranques de línea más sostenibles mediante la reducción de papel utilizado.
- Mejora del sistema de comunicación entre departamentos (en un arranque de línea de un producto en serie suelen estar implicados principalmente los departamentos de producción, calidad y oficina técnica).
- Optimización del sistema de gestión de la documentación.

### **3. Justificación**

La empresa sobre la que se va a realizar el estudio cuenta con una línea productiva relativamente nueva (máquinas en proceso de amortización) cuyo indicador OEE es bajo, alrededor de un 55%.

Debido a la previsión de ventas de 2020 y a la velocidad a la que se encuentra la línea necesitan alcanzar valores de OEE en torno al 70% para cumplir con lo pedidos.

Desglosando los distintos factores del OEE:

- % Rendimiento = 86%
- % Calidad = 99%
- % Disponibilidad = 65%

Analizando cada uno de los factores que miden la eficiencia de su línea se observa que el % de calidad es del 99 %. Esto quiere decir que son muy eficientes a la hora de producir piezas no ok. El % de calidad mide cuantas piezas ok fabricas sobre las totales, es decir, mide la cantidad de rechazos que tiene la línea. El rendimiento de la línea es de un 86%. Se trata de un valor aceptable ya que a partir de valores de OEE del 80 % se consideran niveles “*World Class*” de OEE (“OEE (Overall Equipment Effectiveness),” 2016). Este nivel indica una alta eficiencia. Para poder incrementar la velocidad de línea en muchos de los casos sería necesario invertir en nuevas máquinas cuando aún no están completamente amortizadas las actuales. El % de rendimiento es bastante superior al de disponibilidad. El % de disponibilidad de un 65 % es el factor que tira hacia abajo el indicador total. Por lo que se debe atacar la mejora de línea desde el punto de vista de este factor. Para alcanzar un OEE de línea del 70% se debe conseguir un % Disponibilidad del 83%.

El 65% de disponibilidad de la línea denota una gran pérdida de tiempo debido a paradas no programadas. Sobre este factor se puede trabajar sin tener que realizar grandes inversiones de capital ya que muchas de estas paradas están relacionadas con operaciones manuales que pueden ser optimizadas o reorganizadas.



La empresa cuenta con un sistema GMAO. El GMAO es un software de mantenimiento asistido por ordenador. Han desarrollado un software de diseño propio hecho a medida para sus necesidades. Una de las funciones, entre muchas otras, es la de captura de tiempos de máquinas. Mediante este programa tienen contabilizadas todas las horas que las máquinas están funcionando y cada vez que una máquina se para, gracias a sensores automáticos distribuidos por la línea o situados en la propia máquina, se inicia una parada hasta que se detecta que la máquina comienza a producir de nuevo. Estas paradas están asignadas directamente a una máquina y a la referencia que se está fabricando, pero deben ser identificadas manualmente por el operario encargado de ese proceso. Para la identificación de paradas cuentan con un listado predefinido. El GMAO analiza estos datos automáticamente y genera informes de disponibilidad por línea y por máquina. Además, permite filtrar por tipo de parada para identificar cuales son las más recurrentes en cada proceso.

Se pueden distinguir tres tipos principales de parada de máquina/línea:

- Paradas programadas: no afectan al porcentaje de disponibilidad de la máquina ya que son mantenimientos preventivos programados y no cuentan dentro del tiempo disponible de máquina (“OEE (Overall Equipment Effectiveness),” 2016).
- Paradas no programadas directas: son aquellas debidas a problemas de averías o paradas que tengan que ver propiamente con la máquina dónde se imputan.
- Paradas no programadas indirectas: a diferencia de las anteriores afectan a la disponibilidad, pero no son debidas a que las máquinas no puedan estar funcionando si no que se deben a factores externos como decisiones de calidad, fallo de sensores que contabilizan las piezas...

PARADAS:	
PARADA NO PROGRAMADA	11 Ajuste máquina
	12 Esperas por otra máquina
	13 Rotura y cambio utillaje
	14 Cambio de referencia
	16 Ajuste visión
	17 Problemas de calidad en serie
	18 No necesaria
PARADA NO PROGRAMADA (INDIRECTA)	19 Regulación stock
	21 Avería eléctrica
	22 Avería mecánica
	23 Avería hidráulica
	25 Avería robot
	26 Avería en otra máquina
	27 Avería mantenimiento
	30 Prototipos/ pruebas horno
	31 Parada programada por mantenimiento preventivo
	32 Parada programada mantenimiento de otra máquina
PARADA PROGRAMADA	33 Parada programada por modificaciones máquina
	41 Falta de tensión u otros
	47 Falta de personal
	48 Espera resultados calidad
	50 Fallo GMAO (sensor sucio)
51 Pendiente de decisión	

Ilustración 5 - Tipos de paradas

En la ilustración 5 se listan las paradas predefinidas por la empresa.

La empresa ha realizado previamente un análisis de las paradas no programadas (las que disminuyen la disponibilidad de la línea) del último año de la línea objetivo. Para cada uno de los procesos que conforman la línea de producción han listado las tres paradas más frecuentes (las que en total suman el mayor número de horas).

De la ilustración 6 se deducen que las paradas con mayor recurrencia en el cómputo total de todos los procesos son:

1. Cambio de referencia (código 14)

Esta parada no programada se refiere al tiempo empleado en el ajuste de la línea para pasar de la fabricación de un producto a otro.

2. Pendiente de decisión (código 51)

Una vez ha ocurrido una incidencia que no pueda ser solventada mediante procesos estandarizados y sea necesaria una decisión por parte de un responsable de departamento se indica este tipo de parada. Implica en su mayoría acuerdos entre los distintos departamentos o reuniones para la toma de decisión.

3. Espera resultados de calidad (código 48)

Tiempo de parada debido a que se están efectuando mediciones y/o controles en el laboratorio de calidad.

TOP 3			
PROCESO 1	11*	13	48
PROCESO 2	26	48	14
PROCESO 3	51	14	50
PROCESO 4	51	27	19
PROCESO 5	25	26	14

Ilustración 6 - TOP 3 de paradas por proceso

Por ello se decide abordar el incremento de OEE mediante la mejora del sistema de arranque de línea centrado en la reducción de tiempos implicados en los cambios de referencia, toma de decisiones y tiempos de medición de protocolos de calidad.

Cada hora que la línea de producción está parada supone un coste de 600 €/h. Si consideramos las horas totales de parada de la línea en función del tiempo planificado de la línea y su porcentaje de disponibilidad se obtiene el siguiente coste en euros para el tiempo total de línea parada:

$$Y(h) = \frac{35}{100} \times Z(h) \times 600 \left(\frac{\text{€}}{h}\right) = 210 \times Z(\text{€})$$

Ecuación 1 - Coste total de paradas no programadas con un 65% de disponibilidad

Siendo Y las horas totales de parada no programada y por tanto las paradas que afectan negativamente al % de disponibilidad y Z las horas totales planificadas de fabricación (no se tienen en cuenta festivos y paradas programadas).

Para poder reducir estos costes es necesario analizar el sistema de arranque de partida para hallar los puntos débiles o aquellos más propensos a ser optimizados al menor coste y con mayor impacto en el tiempo total del arranque.

#### 4. Sistema de Arranque de Línea Inicial

Se entiende por arranque de línea el tiempo de ajuste necesario para preparar las distintas máquinas, procesos y sistemas de una línea de fabricación desde que se fabrica la última pieza buena de un lote (referencia A) hasta que se hace la primera pieza buena del siguiente lote (referencia B).

Una referencia es un tipo de producto con características y geometrías únicas. Es cada uno de los productos que se pueden fabricar en una línea de producción.

La línea de fabricación de la que se parte está formada por los siguientes procesos (5 en total) y máquinas principales:

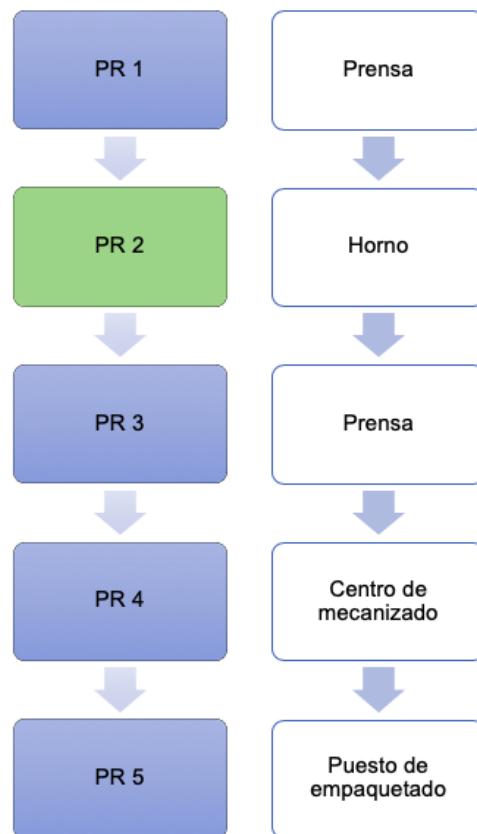


Ilustración 7 - Proceso productivo de la línea de fabricación

Se pueden distinguir dos tipos de procesos de acuerdo con el diagrama de flujo de actividades que siguen en su arranque/ajuste en el cambio de referencia:

1. Proceso completo
2. Proceso parcial

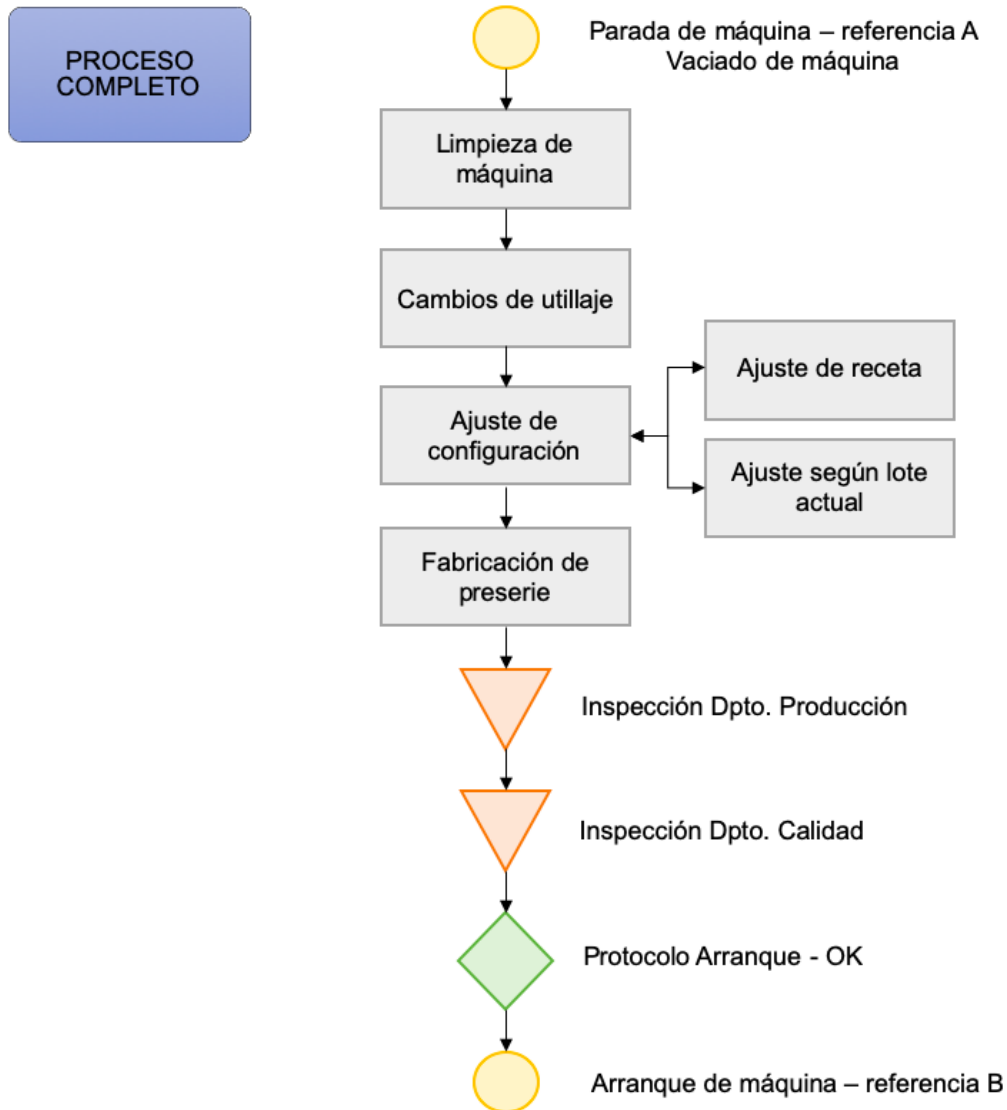


Ilustración 8 - Flujograma de tareas de un proceso completo de arranque

En los procesos denominados completos una vez se vacía la máquina de producto de la referencia A se para la máquina y se empieza con el nuevo ajuste. El departamento de producción realiza las tareas de limpieza de máquina (incluyendo los auto mantenimientos necesarios), cambios de utillaje, ajustes en la configuración interna de la máquina (primero realizan el ajuste de configuración según receta de la nueva referencia y después deben ajustar ciertos parámetros de acuerdo a cómo venga la pieza de este lote de pasos aguas arriba) y fabrican una preserie para comprobar el ajuste de la máquina antes de arrancar de continuo a producir el lote completo. Una vez está acabada la preserie el operario del dpto. de producción encargado del ajuste de ese paso de proceso controla las características indicadas en el ciclo de control como nivel

1 (responsable de medición – dpto. de producción) en una cantidad de piezas determinada. Una vez verifica que son ok lleva piezas al laboratorio de calidad para que ellos realicen los controles de nivel 2 (responsable de medición – dpto. de calidad). Cuando todas las características están comprobadas y dentro de los límites establecidos se da por completado el protocolo de medición y la máquina (paso de proceso) está lista para el arranque continuo. Su tiempo de ajuste acaba, pero el tiempo de arranque de línea continua hasta que se dé por ok el último protocolo, perteneciente al proceso 5 (empaquetado).

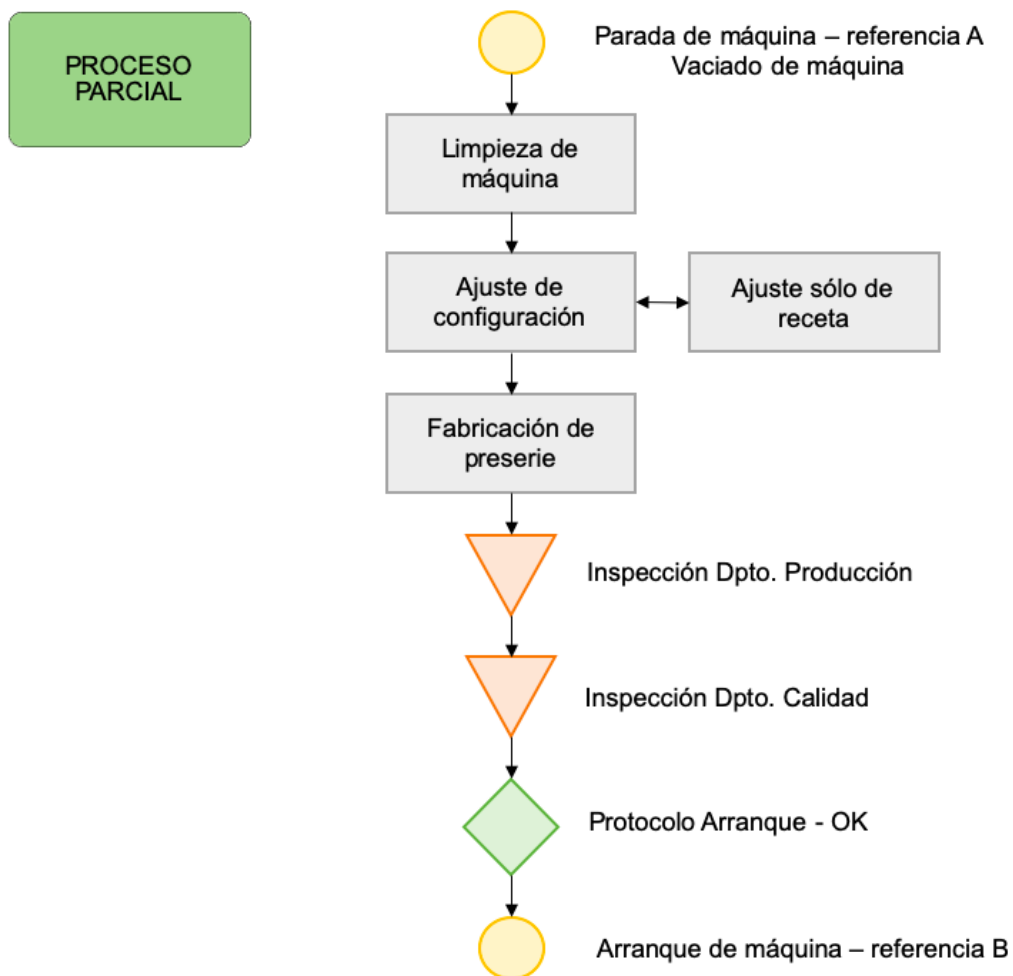


Ilustración 9 - Flujograma de tareas de un proceso parcial de arranque

Los procesos parciales (PR 2) se diferencian de los procesos completos (PR 1-3-4-5) en que no necesitan cambios de utillaje en máquina, es decir, no es necesario que el operario realice la serie de actividades relacionadas con el cambio de partes de máquina (cambios de utillaje en prensas, cambios de pinzas y plaquitas en los centros de mecanizado...). Tampoco es necesario un ajuste

específico según el lote de fabricación actual que comienza lo cual se traduce en un menor tiempo de ajuste, casi nulo.

Dado que se trata de una línea de fabricación continua en el que cada proceso depende del anterior (no necesariamente del inmediatamente anterior, pero sí de uno aguas arriba) no solo se ha de tener en cuenta el tiempo que se tarda en modificar/ajustar mecánicamente cada paso de proceso si no también la calidad de pieza fabricada tras dicho ajuste. Para ello cada paso de proceso cuenta con un ciclo de control en el que se detallan las características a medir y analizar y los valores máximos y mínimos aceptables. En el caso de cualidades atributivas se especifican las cualidades requeridas.

Debido a todo esto, se realiza una preserie en la que se van controlando todos los pasos de proceso de acuerdo al ciclo de control (protocolo) correspondiente y una vez se vayan obteniendo valores de protocolo completo ok se puede pasar al ajuste del siguiente proceso. Estas dependencias se pueden observar en la ilustración 10.

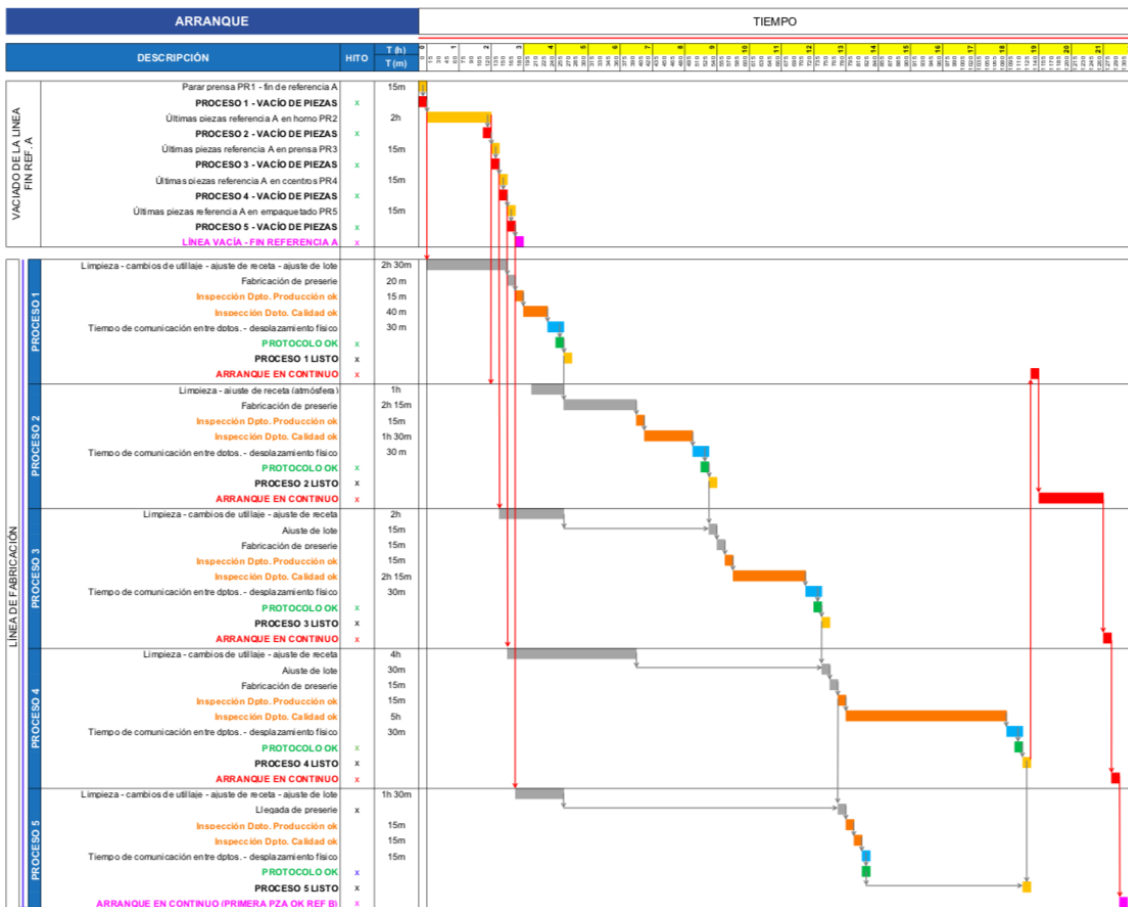


Ilustración 10 - Cronograma de arranque de línea - completo



A continuación, se explica el cronograma de arranque en profundidad.

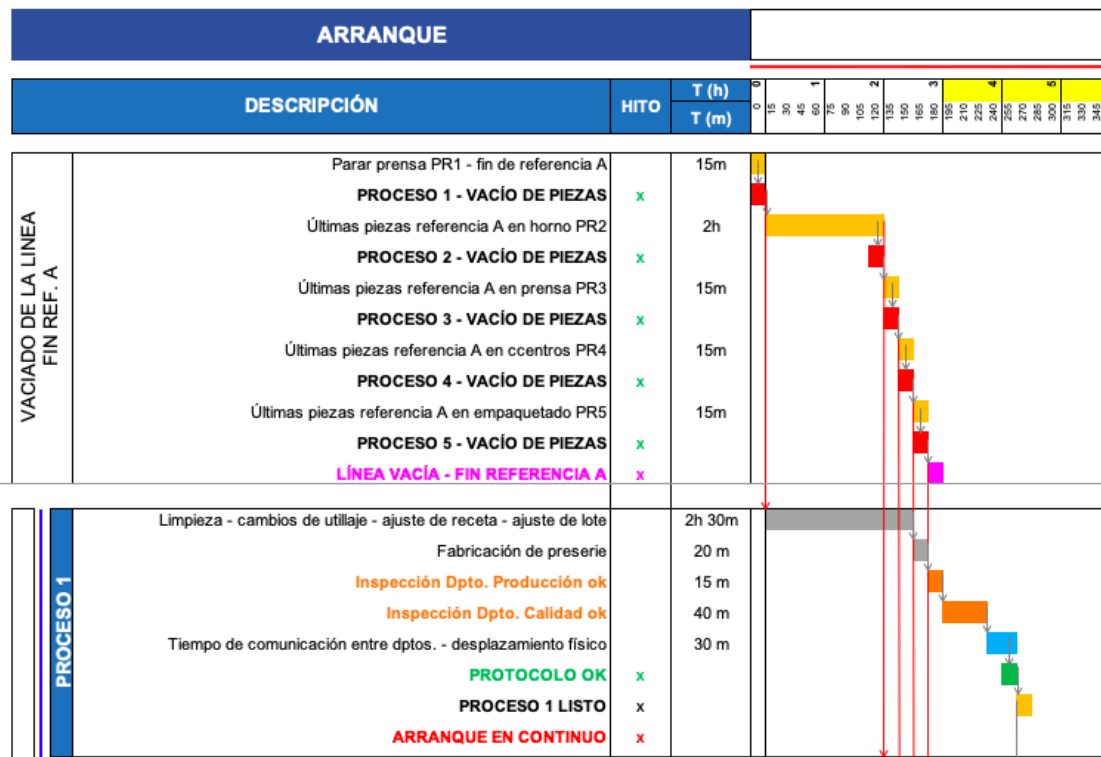


Ilustración 11 - Cronograma de arranque de línea - vaciado y proceso 1

En primer lugar, la línea de fabricación se debe vaciar de producto de la referencia A. Cada paso de proceso tarda un tiempo determinado debido al tipo de maquinaria empleada (el proceso 2 se trata de un tratamiento térmico de un horno con un recorrido de 2 h por pieza). Cuando la última pieza de la referencia A es empaquetada comienza el tiempo de arranque de línea para la siguiente referencia B.

A medida que los procesos se van vaciando se puede comenzar con el ajuste de cada parte.

El proceso 1 es un proceso completo, es decir, requiere de cambio de utillaje específico y de ajuste por lote de fabricación actual. Esto quiere decir que a pesar de que no es un producto nuevo, en cada fabricación es necesario hacer pequeños ajustes que dependen de las condiciones actuales como, por ejemplo, variabilidad por temperatura atmosférica, la materia prima utilizada puede tener pequeñas diferencias, la maquinaria sufre desgaste y cambios con el tiempo por lo que puede necesitar pequeñas modificaciones de posición...

En este caso, como se trata del primer proceso de la línea estos ajustes por lote se realizan inmediatamente después del ajuste de configuración. Una vez tenemos todo el proceso listo mecánicamente se fabrica una preserie (de 200 piezas para que las máquinas se calienten y se estabilicen, y podamos inspeccionar piezas representativas de las que se fabricarían durante la larga producción).

La razón de fabricar esta preserie es asegurar la producción. Puede ocurrir que no detectemos fallos en las piezas del proceso 1 hasta el proceso 4. Debido al estado de la pieza (hasta que no pasa por el horno no es una pieza sólida si no prensada) en cada paso de proceso se pueden medir unas características determinadas. También se da el caso de que una dimensión que se consigue en el proceso 1 sufre variaciones en el proceso 3 (calculada previamente la relación de mermas) pero si dicha característica sale no ok en el paso 3 será necesario modificarla en el paso 1.

Una vez fabricada esta preserie, de acuerdo al ciclo de control, el dpto. de producción realiza unas inspecciones que si son ok llevarán piezas al dpto. de calidad para que estos revisen su parte.

Una vez todas las medidas de protocolo se hayan revisado y sean ok, calidad lo comunica al dpto. de producción que va a recoger dichas mediciones al laboratorio (el laboratorio se encuentra en una nave contigua, por eso se pone un margen de 30 minutos para esta comunicación). El encargado de las comunicaciones es el jefe de la línea de producción. Una vez en su poder el protocolo ok, avisa al operario de prensa y posteriormente al del paso siguiente.



El proceso 3 al igual que el 1 es un proceso completo. Una vez se vació pudo comenzar su ajuste (todas aquellas actividades no relacionadas con el lote actual). Pero después debe esperar hasta que el proceso 2 está listo para ajustar las variables que dependen de la preserie.

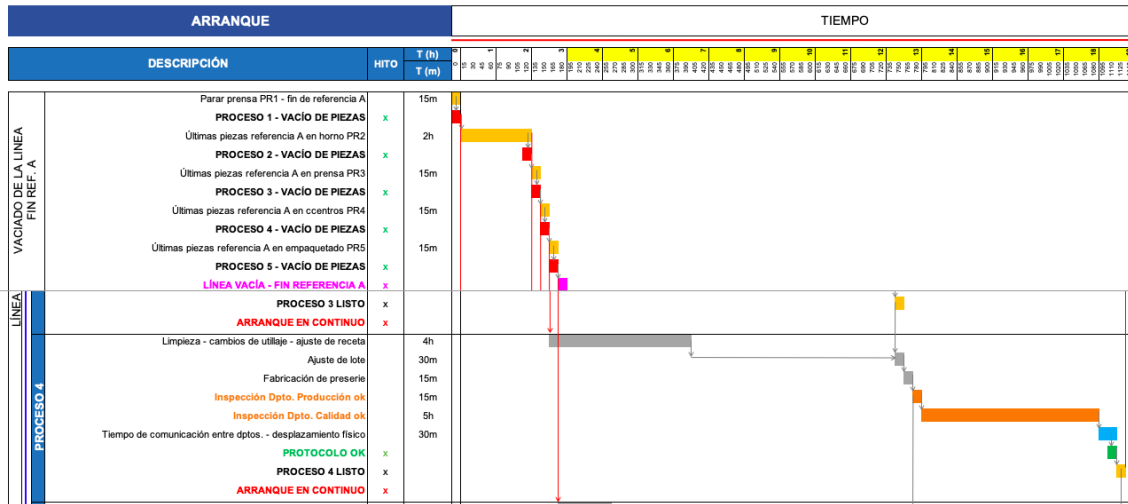


Ilustración 14 - Cronograma de arranque de línea - proceso 4

El proceso 4, al ser un proceso también completo, debe esperar por el proceso 3. En este proceso encontramos una característica especial y es que una vez obtenemos el protocolo ok podemos arrancar de continuo la línea (empezando por la prensa del proceso 1) ya que tenemos asegurada la calidad de pieza (parte del cronograma en rojo).

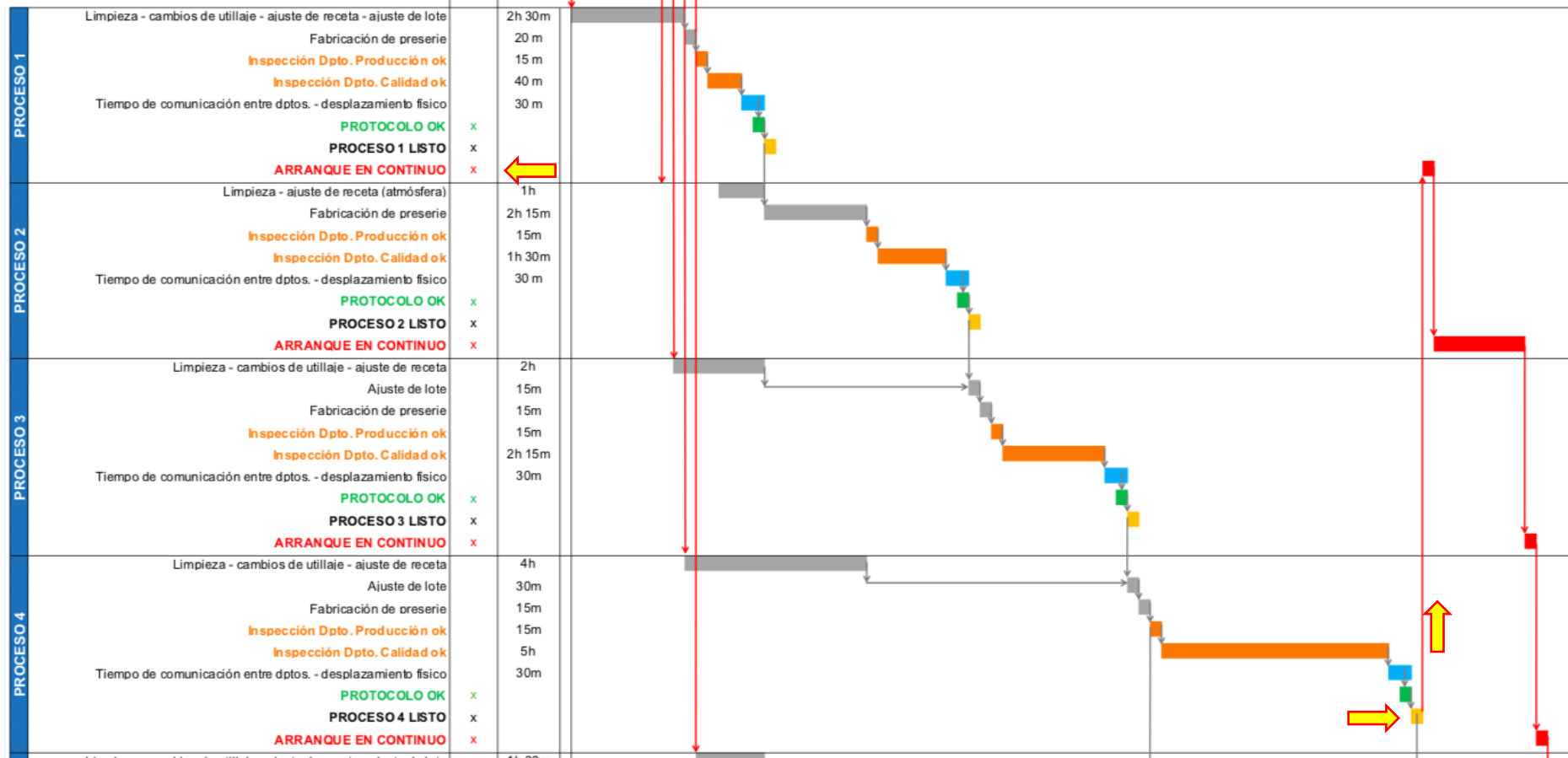


Ilustración 15 - Cronograma de arranque de línea - arranque continuo

El proceso 5 a pesar de ser un proceso completo es algo distinto ya que sus cambios de utillaje específicos no influyen en la calidad de la pieza final. Es un puesto de empaquetado y se deben ajustar las máquinas de controles de calidad 100%. Y finalmente una revisión visual completa de la pieza ya terminada. El tiempo de comunicación es menor en este paso ya que todos los controles se realizan en la línea de fabricación. La primera pieza ok de la referencia B que llega a empaquetado nos indica el fin del tiempo de arranque de línea.

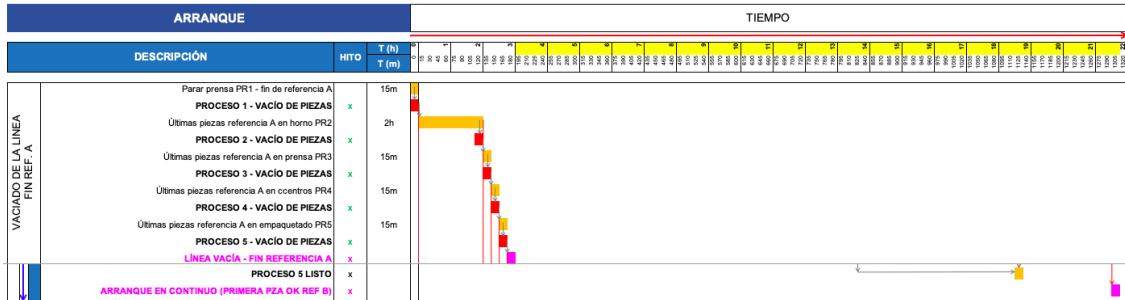


Ilustración 16 - Cronograma de arranque de línea - tiempo total

**El tiempo total empleado en el arranque de la línea es de 18 horas y 45 minutos (1125 minutos).**

Es necesario destacar que en este cronograma de arranque base del que se parte se asume lo siguiente:

- Se cuenta con un operario de producción por paso de proceso más un jefe de línea que supervisa y se encarga de las comunicaciones con el laboratorio de calidad.
- No hay colas en el laboratorio de calidad para las mediciones.
- Las máquinas están siempre disponibles.
- Los protocolos de medición salen ok a la primera (no es necesario repetir mediciones ni ajustar de nuevo las máquinas).

Se trata del cronograma de arranque ideal sobre el que se debe trabajar. Las variables que originan ruido son atacadas con proyectos independientes.

Cada paso de proceso cuenta con un número distinto de características a medir.

Paso de proceso (tipo de proceso)	Pieza (tipo)	Código (XXXX)	Cliente (X)	Edición Revisión	(Fecha) (X)	LOGO EMPRESA		
<b>PROCESO 1</b>					<b>ARRANQUE</b>			<b>INSPECCIÓN</b>
SPC	Especificación	U	LSC	LIC	Muestra	Sist. Med.	Nivel	Registro
S	Característica 1	mm	(x)	(x)	5	(x)	2	BDD
N	Característica 2	mm	(x)	(x)	5	(x)	2	BDD
N	Característica 3	mm	(x)	(x)	5	(x)	2	BDD
N	Característica 4	mm	(x)	(x)	5	(x)	2	BDD
N	Característica 5	mm	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 6	mm	(x)	(x)	5	(x)	2	BDD
N	Característica 7	mm	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 8	-	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 9	-	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 10	-	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 11	g/cm3	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 12	g/cm3	(x)	(x)	1	(x)	1	BDD
N	Característica 13	mm	(x)	(x)	1	(x)	1	BDD

SPC: Características para control de proceso estadístico    LSC: límite superior de control  
 Nivel 1: Producción    LIC: límite inferior de control  
 Nivel 2: Calidad

<b>Elaborado</b>	<b>Autorizado</b>
(firma)	(firma)

Ilustración 17 - Ciclo de control del proceso 1



Paso de proceso (tipo de proceso)	Pieza (tipo)	Código (XXXX)	Cliente (X)	Edición Revisión	(Fecha) (X)	LOGO EMPRESA		
<b>PROCESO 2</b>					<b>ARRANQUE</b>			<b>INSPECCIÓN</b>
SPC	Especificación	U	LSC	LIC	Muestra	Sist. Med.	Nivel	Registro
N	Característica 1	-	(x)	(x)	1	(x)	1	BDD
N	Característica 2	%C	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 3	%C	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 4	%C	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 5	-	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 6	-	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 7	-	(x)	(x)	5	(x)	1	BDD
N	Característica 8	g/cm3	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
SPC: Características para control de proceso estadístico    LSC: límite superior de control Nivel 1: Producción    LIC: límite inferior de control Nivel 2: Calidad								
<b>Elaborado</b>					<b>Autorizado</b>			
(firma)					(firma)			

Ilustración 18 - Ciclo de control del proceso 2



Paso de proceso (tipo de proceso)	Pieza (tipo)	Código (XXXX)	Cliente (X)	Edición Revisión	(Fecha) (X)	LOGO EMPRESA		
<b>PROCESO 3</b>					<b>ARRANQUE</b>			<b>INSPECCIÓN</b>
SPC	Especificación	U	LSC	LIC	Muestra	Sist. Med.	Nivel	Registro
S	Característica 1	mm	(x)	(x)	3	(x)	2	BDD
N	Característica 2	mm	(x)	(x)	3	(x)	2	BDD
N	Característica 3	mm	(x)	(x)	3	(x)	2	BDD
N	Característica 4	mm	(x)	(x)	3	(x)	2	BDD
N	Característica 5	mm	(x)	(x)	3	(x)	2	BDD
N	Característica 6	mm	(x)	(x)	3	(x)	2	BDD
N	Característica 7	-	(x)	(x)	5	(x)	1	BDD
N	Característica 8	-	(x)	(x)	5	(x)	1	BDD
N	Característica 9	-	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 10	mm	(x)	(x)	5	(x)	2	BDD
N	Característica 11	mm	(x)	(x)	5	(x)	2	BDD
N	Característica 12	-	(x)	(x)	1	(x)	1	BDD
N	Característica 13	-	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 14	g/cm3	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 15	g/cm3	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 16	g/cm3	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 17	g/cm3	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 18	mm	(x)	(x)	1	(x)	1	BDD
N	Característica 19	-	(x)	(x)	1	(x)	1	BDD
N	Característica 20	-	(x)	(x)	5	(x)	1	BDD
N	Característica 21	mm	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 22	mm	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 23	mm	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 24	mm	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 25	mm	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 26	mm	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 27	mm	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 28	mm	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD

SPC: Características para control de proceso estadístico	LSC: límite superior de control
Nivel 1: Producción	LIC: límite inferior de control
Nivel 2: Calidad	

<b>Elaborado</b>	<b>Autorizado</b>
(firma)	(firma)

Ilustración 19 - Ciclo de control del proceso 3

Paso de proceso (tipo de proceso)	Pieza (tipo)	Código (XXXX)	Cliente (X)	Edición Revisión	(Fecha) (X)	LOGO EMPRESA		
<b>PROCESO 4</b>				<b>ARRANQUE</b>		<b>INSPECCIÓN</b>		
SPC	Especificación	U	LSC	LIC	Muestra	Sist. Med.	Nivel	Registro
S	Característica 1	mm	(x)	(x)	1	(x)	1	BDD
N	Característica 2	mm	(x)	(x)	1	(x)	1	BDD
N	Característica 3	mm	(x)	(x)	1	(x)	1	BDD
N	Característica 4	-	(x)	(x)	1	(x)	1	BDD
N	Característica 5	micra	(x)	(x)	1	(x)	1	BDD
N	Característica 6	-	(x)	(x)	1	(x)	1	BDD
N	Característica 7	-	(x)	(x)	1	(x)	1	BDD
N	Característica 8	mm	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 9	mm	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 10	mm	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 11	mm	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 12	mm	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 13	mm	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 14	mm	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 15	mm	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 16	mm	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 17	mm	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 18	°	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 19	mm	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 20	mm	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 21	mm	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 22	mm	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 23	mm	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 24	mm	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 25	mm	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 26	mm	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 27	mm	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 28	mm	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 29	mm	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 30	mm	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
N	Característica 31	mm	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD

SPC: Características para control de proceso estadístico    LSC: límite superior de control  
 Nivel 1: Producción    LIC: límite inferior de control  
 Nivel 2: Calidad

<b>Elaborado</b>	<b>Autorizado</b>
(firma)	(firma)

Ilustración 20 - Ciclo de control del proceso 4

Paso de proceso (tipo de proceso)	Pieza (tipo)	Código (XXXX)	Cliente (X)	Edición Revisión	(Fecha) (X)	LOGO EMPRESA		
<b>PROCESO 5</b>					<b>ARRANQUE</b>			<b>INSPECCIÓN</b>
SPC	Especificación	U	LSC	LIC	Muestra	Sist. Med.	Nivel	Registro
N	Característica 1	mm	(x)	(x)	5	(x)	1	BDD
N	Característica 2	mm	(x)	(x)	5	(x)	1	BDD
N	Característica 3	mm	(x)	(x)	5	(x)	2	BDD
N	Característica 4	-	(x)	(x)	1	(x)	2	BDD
SPC: Características para control de proceso estadístico    LSC: límite superior de control Nivel 1: Producción    LIC: límite inferior de control Nivel 2: Calidad								
<b>Elaborado</b>					<b>Autorizado</b>			
(firma)					(firma)			

Ilustración 21 - Ciclo de control del proceso 5

Los tiempos totales empleados en inspecciones de calidad son:

Tabla 1 - Características totales de los ciclos de control por proceso

CICLOS DE CONTROL		
PROCESO	Nº CARACTERÍSTICAS A MEDIR	TIEMPO TOTAL (min)
1	13	55
2	8	105
3	28	150
4	31	315
5	4	30

Estos ciclos de control sirven como guion para la inspección de todas las características por paso de proceso. En ellos se especifica la cantidad de muestreo necesaria y el nivel, es decir, el responsable de tomar dicha medición. Siendo el nivel 1 producción y el 2 calidad. Las características de nivel 1 suelen estar asociadas a controles visuales y alguna medida utilizando máquinas de uso rápido y fácil.

Cada una de estas características se mide de una forma diferente, ya sea con máquinas tridimensionales, lentes microscópicas, balanzas, perfilómetros... Todos estos datos son volcados en distintas bases de datos. Por lo que para tener un control del arranque por paso de proceso es necesaria la generación de muchos documentos impresos que el jefe de equipo recoge y gestiona en carpetas físicas de documentación sobre arranques. Esta documentación sirve de guía orientativa en el caso de encontrar algún valor fuera de los límites para realizar acciones correctivas similares o descubrir más rápidamente la causa raíz del fallo.

A continuación, se revisan las metodologías y técnicas que se han desarrollado para la mejora de este tipo de procesos de arranque de líneas de fabricación.

## 5. Estado del Arte

Dado los datos anteriormente presentados respecto a las ventas de coches anuales (The Statistics Portal, 2019) es clara la necesidad de las empresas de aumentar su disponibilidad de máquina y hacer cambios de utillajes y ajustes cada vez más rápidos. Esta necesidad no es algo nuevo, ya en 1985 Shigeo Shingo desarrollo la metodología SMED (“*Single Minute Exchange Die*”) (Shingo, 1985).

Esta metodología se basa en 3 etapas (Shingo, 1985):

1. Separar las operaciones asociadas a cambios de referencia (por referencia se entiende cada pieza fabricada con sus características especiales que implican cambios en la maquinaria con la que se hace, por ejemplo cambio de punzones y matrices en prensas hidráulicas, cambios de plaquitas en centros de mecanizado...) en internas (es necesario realizarlas en la propia máquina durante la parada) y externas (se pueden hacer fuera de la “línea” por lo que no penalizarían la disponibilidad de la máquina).
2. Convertir el mayor número de operaciones internas en externas.

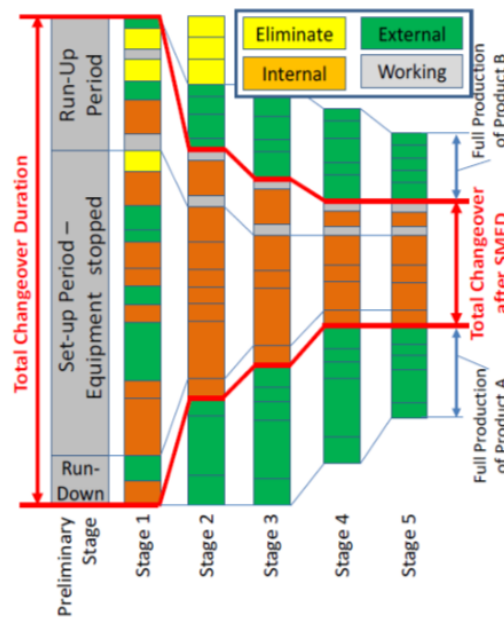


Ilustración 22 – Método SMED (Kemal Karasu et al., 2014).

### 3. Estandarizar todas las operaciones de ajustes a lo largo de las distintas máquinas.

La metodología SMED presenta limitaciones ya que fue ideada para aplicar en una máquina controlada por un solo operario. Pero debido a la gran flexibilidad de los procesos productivos y que cada vez se requieren cambios de referencias más rápidos, por la existencia de mercados dinámicos, ha habido múltiples investigaciones y nuevos desarrollos en este campo. Radu Godina *et al.* han demostrado la incipiente inquietud que ha generado este campo de investigación (Godina *et al.*, 2018). En la ilustración 5 se ve el incremento de publicaciones desde 2012. El 21.6% de los casos de estudio realizados estaban orientados al sector de la automoción (Godina *et al.*, 2018), lo cual coincide con el incremento de venta anuales de coches de la época (The Statistics Portal, 2019).

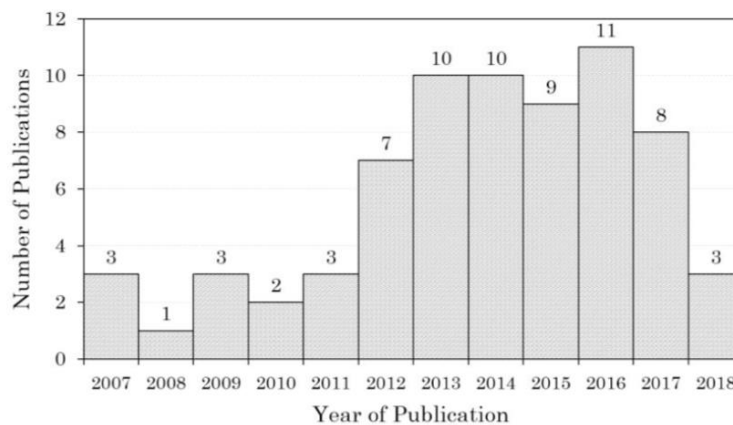


Ilustración 23– Distribución de las publicaciones consideradas en el intervalo de tiempo definido (Godina *et al.*, 2018).

S. Palanisamy *et al.* proponen la integración de SMED junto con la implementación de un sistema MES (S. Palanisamy, 2013).

Proponen un modelo de mejora dividido en 5 etapas (S. Palanisamy, 2013):

- Etapa 1: Panificar la estrategia con la ayuda de MES.
  - a) Reconfigurar las estaciones de trabajo.
  - b) Movimiento de recursos materiales.
  - c) Colecta de datos.
- Etapa 2: Identificar procesos internos y externos.
- Etapa 3: Separar procesos internos y externos.
- Etapa 4: Convertir el mayor número de procesos internos en externos.

- Etapa 5: Estandarizar en la línea todas las actividades.

Las líneas de fabricación dedicadas a componentes de coches suelen estar formadas por máquinas de distintas clases (cada máquina se dedica a un paso de proceso distinto) y están supervisadas por varios operarios o grupos de trabajo. El uso de sistemas MES permite una planificación previa y un control de todas las actividades necesarias. Se consiguió reducir en un 69% los tiempos de arranque de una empresa de automoción mejorando su productividad en un 18.86% (S. Palanisamy, 2013).

Además, a lo largo del desarrollo de mejoras de tiempos de arranques es necesario controlar los indicadores que previamente se hayan establecido y ver si los objetivos de reducción de tiempos son alcanzados.

Uno de los indicadores más utilizados es el OEE (Hansen, 2001) (“*Overall Equipment Effectiveness*”). Esta técnica de control se basa en 3 indicadores (Hansen, 2001):

- Calidad
- Disponibilidad
- Rendimiento

El porcentaje de disponibilidad de una máquina se ve afectado por tiempos de parada debidos a ajustes, cambios de referencias y a micro paradas (reducciones de velocidad instantánea) (Hansen, 2001).

Para la reducción de pérdidas debidas a tiempos de *stand-by* de máquinas es necesario la identificación de cuellos de botella (máquinas más lentas y que por tanto causan una disminución de la velocidad de línea) (Dettmer, 1997) y la ventaja de aplicación del OEE elimina el riesgo de una mala identificación de la causa raíz de la parada ya que los distintos factores indican el lugar del problema. Mediante el uso de la técnica OEE y la metodología SMED, S. Vijaya Kumar *et al.* logran reducciones de un 20% en tiempos de espera una subida de eficiencia del 4.4% (Kumar *et al.*, 2014).

P. G. Ferradás *et al.* identifican la falta de análisis de implementaciones fallidas de SMED y el análisis de las causas (Ferradás and Salonitis, 2013). Durante la implementación de SMED las empresas tienden a centrarse en la reducción de

tiempos mediante la optimización de las tareas asociadas al *set-up period* olvidándose del *run-up period* (Ferradás and Salonitis, 2013). Durante el run-up se pierde mucho tiempo relacionado con ajustes y controles de calidad hasta alcanzar de nuevo ratios de producción normales. Además, se centran en mejoras relacionadas con metodología y olvidan estudiar posibles cambios de utillaje (a veces es necesario realizar inversiones) o mejoras técnicas de máquinas que permitan cambios más eficaces (Ferradás and Salonitis, 2013).

M. K. Karasu *et al.* proponen la combinación de SMED con el método Taguchi (Kemal Karasu et al., 2014). Tras la identificación de los factores más importantes y sus posibles valores utilizan el método Taguchi para reducir el número de intentos a realizar y posteriormente aplican un análisis ANOVA mediante *Minitab* para entender mejor el efecto de los distintos factores (Kemal Karasu et al., 2014).

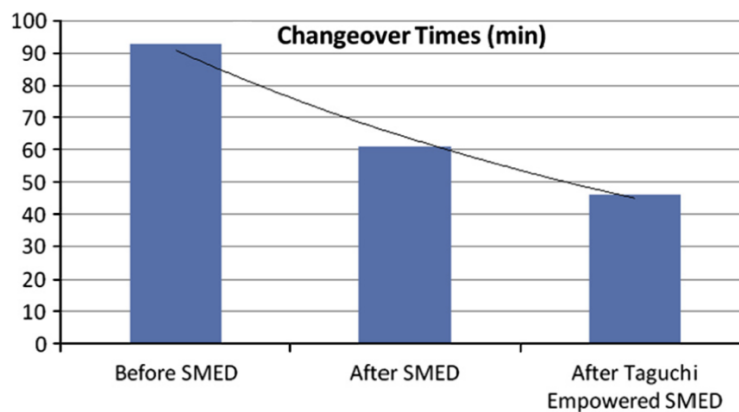


Ilustración 24 – Progreso del tiempo de ajuste (Kemal Karasu et al., 2014).

El impacto medioambiental (Gungor and Evans, 2015) de los cambios de referencia es un tema pendiente de analizar y desarrollar como exponen Z. E. Gungor *et al.* Las empresas son conscientes de los residuos contaminantes que generan y el consumo eléctrico durante los ajustes de máquina, pero aún no están definidas métricas tan claras como las que hay para el control de los tiempos muertos de máquinas debidos a ajustes. Z. E. Gungor *et al.* ponen de manifiesto la importancia de calcular no sólo el impacto económico, pero también el medio ambiental dada la clara tendencia de la sociedad de ir hacia unas líneas de desarrollo sostenible (Gungor and Evans, 2015).



Guo-Sheng Liu *et al.* proponen un algoritmo genético mejorado unido a la teoría de conjuntos difusos en tiempos de arranque *state-dependent* (la mayoría de investigaciones se centran en *sequence-dependent setup times*) (Liu *et al.*, 2017). Defienden un modelo matemático que busca reducir la incertidumbre de los procesos necesarios para los ajustes de máquinas y así optimizar los arranques de líneas productivas (Liu *et al.*, 2017).

Los algoritmos genéticos han sido campo de estudio por muchos más autores. A. (Duman, 2012) Sioud *et al.* desarrollaron una metodología para minimizar la impuntualidad total mediante un análisis de secuenciación de trabajos dependientes (construyen conjuntos de dominios de posiciones formadas por las distintas tareas) mediante el uso de un algoritmo genético híbrido (HGA) (Sioud *et al.*, 2012). Este HGA combina algoritmos genéticos, programación de restricciones, algoritmos MOE (*multi-objective evolutionary algorithm*) y ACO (*ant colony optimization*) (Sioud *et al.*, 2012).

```

x          /* Fixed jobs number */
j          /* Job to be fixed */
Dpos      /* Position domains set */
dpos      /* Selected positions domain */
Lp       /* Tabu domains list */
FOR i: 1..x DO
  /* Position and job selection*/
  DO
    dpos <- Select a domain in Dpos with the smallest domain size
    IF dpos != 1 THEN
      Select randomly a domain dpos
    END IF
    WHILE dpos ∉ Lp
      j <- Select randomly a job in dpos
      Fix the job j at the pos position
      /*Selected job propagation */
      Delete the job j from the other domains
      Update the tabu list Lp
      i <- i+1
    END FOR
  
```

Ilustración 25 – Algoritmo de fijación de posiciones (Sioud *et al.*, 2012).

A. Sioud *et al.* proponen un algoritmo MBO (Duman, 2012) mejorado (EMBO, *enhanced migrating bird optimization algorithm*) (Sioud and Gagné, 2018) para minimizar el ajuste en PFS (*permutation flowshop*, las acciones se repiten a lo largo de todas las máquinas por lo que no se solapan actividades) con SDST (*sequence-dependent setup times*). Mediante el uso de inserción de movimientos, una lista tabú (parejas de movimientos que no se pueden intercambiar), un mecanismo de reanudación y un proceso de selección del líder

original (Duman, 2012) demuestran la efectividad de este algoritmo mejorado frente a MBO tradicionales (Sioud and Gagné, 2018).

**Algorithm 3** The EMBO algorithm.

```

1: Initialize  $n$  random solutions placed on a hypothetical V formation
2: for  $i := 0$  to  $K$  do
3:   for  $j := 0$  to  $m$  do
4:     Apply STH heuristic to the leader with  $b$  iterations
5:     Update the leader age variable
6:     while Verifying the tabu list do
7:       Generate  $k$  solutions using the swap and forward insertion
8:     end while
9:     Update the leader age variable
10:    for all the other flock solutions do
11:      Apply STH heuristic to the solution with  $b$  iterations
12:      Update the solution age variable
13:      Integrate  $k-x$  best neighbors from the solution in the front
14:      while Verifying the tabu list do
15:        Generate  $x$  solutions using the swap and the forward insertions
16:      end while
17:      Update the solution age variable
18:    end for
19:  end for
20:  Use pseudo-random rule according to the age to select a new leader
21:  Move the leader to the end of the corresponding wing
22: end for
  
```

Ilustración 26 – Algoritmo EMBO propuesto (Sioud and Gagné, 2018)

Al-Akel Karam et al. consiguen una reducción de arranques del 30% mediante la implementación de herramientas de *Lean Manufacturing* tales como SMED, redistribución FTE y ayudas visuales que incrementan la involucración de los operarios (Karam et al., 2018). La disposición de pantallas informativas con ratios de producción ayuda a aumentar la motivación de los operarios dándoles una vista más amplia de cómo afecta cada tarea en el tiempo de ajuste (Karam et al., 2018).

El auge de la cuarta revolución industrial, conocida como Industria 4.0, ha abierto un nuevo espectro de mejoras en la industria.

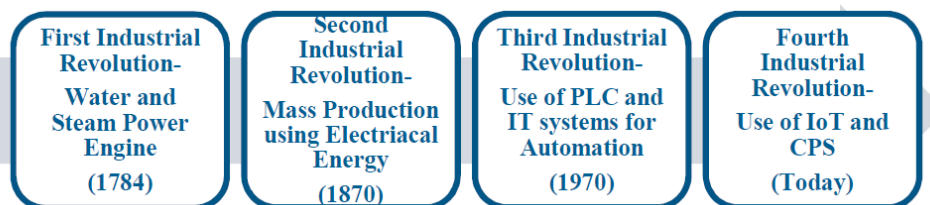


Ilustración 27 – Las cuatro revoluciones industriales (Vaidya et al., 2018).

Uno de sus pilares fundamentales, la realidad aumentada, permite reducir los tiempos de ajuste mediante el uso de información en tiempo real para mejorar la capacidad de decisión (Vaidya et al., 2018). Además, los procedimientos de



trabajo estándar se verán también optimizados ya que el operario podrá recibir instrucciones al mismo tiempo que realiza la acción en la máquina (Vaidya et al., 2018). Saurabh Vaidya *et al.* exponen los retos de esta revolución industrial y cómo puede afectar positivamente a la eficiencia de las líneas productivas.

## 5.1. Análisis Crítico

Tras la revisión bibliográfica realizada, se analizan las aportaciones de cada heurística y su grado de interés (A, alto; M, medio y B, bajo) para el sistema de arranque de línea a diseñar (objetivo final del estudio).

Tabla 2 - Análisis crítico del estado del arte

ID.	Heurística	Aportaciones a la ciencia	Análisis	Interés
1	<b>SMED</b> (Shingo, 1985)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Identificación de operaciones internas y externas.</li> <li>Conversión de operaciones internas en externas.</li> <li>Extrapolación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Diseñado para una máquina con un operario.</li> <li>Para líneas Sequence DST.</li> </ul>	M
2	<b>SMED + MES</b> (Ferradás and Salonitis, 2013)	Planificación de la estrategia previa a SMED: <ul style="list-style-type: none"> <li>Reconfigurar las estaciones de trabajo.</li> <li>Movimiento de recursos materiales.</li> <li>Bases de datos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Para líneas Sequence DST.</li> <li>No propone ninguna innovación.</li> </ul>	B
3	<b>SMED + OEE</b> (Kumar et al., 2014)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Control de objetivos (tiempos) mediante indicador OEE.</li> <li>Especificación del factor problemático (calidad, disponibilidad o rendimiento)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>El indicador OEE solo sirve para definir el problema.</li> </ul>	B

ID.	Heurística	Aportaciones a la ciencia	Análisis	Interés
4	<b>SMED + Inversiones para la Mejora de Máquinas</b> (Ferradás and Saloniis, 2013)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Identifica que las inversiones en mejoras de especificaciones técnicas de máquinas no suelen ser el objetivo de las metodologías.</li> <li>Propone un nuevo punto de vista.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>La mejora continua es necesaria, pero en fábricas con máquinas avanzadas no es aplicable.</li> <li>Requiere inversión de capital.</li> </ul>	M
5	<b>SMED + Método Taguchi + Análisis ANOVA</b> (Kemal Karasu et al., 2014)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Disminución del ruido durante los arranques.</li> <li>Ponderación de los factores de ruido, verificación de su influencia en el tiempo total de ajuste.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Permite atacar los problemas relevantes que aporten una mejora significativa.</li> <li>Fácil de diseñar experimentos.</li> </ul>	A
6	<b>Cambios Eco eficientes</b> (Gungor and Evans, 2015)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reflexión sobre el impacto medioambiental y la sostenibilidad de las operaciones.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Impacto ético.</li> <li>Difícil de implementar (mejoras indirectas que no son tan "visibles").</li> </ul>	B
7	<b>GA + Teoría de Conjuntos Difusos</b> (Liu et al., 2017)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reducción de la incertidumbre de operaciones mediante la aplicación de la Teoría de Conjuntos Difusos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Para State-dependent ST.</li> <li>Novedoso.</li> <li>Mejora de algoritmos genéticos.</li> </ul>	A

ID.	Heurística	Aportaciones a la ciencia	Análisis	Interés
8	<b>HGA (Hybrid GA)</b> (Sioud et al., 2012)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Análisis de secuenciación de tareas dependientes.</li> <li>• GA + constraints programming + MOE algorithm + ACO.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para líneas Sequence DST.</li> <li>• Novedoso.</li> <li>• Mejora de algoritmos genéticos.</li> </ul>	M
9	<b>EMBO (Enhanced MBO)</b> (Sioud and Gagné, 2018)	<p>Uso de:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistemas variados de inserción de movimientos.</li> <li>• Implementación de lista tabú.</li> <li>• Mecanismo de reanudación.</li> <li>• Proceso de selección del líder original.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mejora de MBO algorithm.</li> <li>• Muy interesante para análisis de comportamiento de recursos humanos.</li> <li>• Para PFS y Sequence DST.</li> </ul>	M
10	<b>SMED + Herramientas Lean Manufacturing</b> (Karam et al., 2018)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de herramientas de LM.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ayudas visuales para incrementar la motivación.</li> <li>• El LM está de moda.</li> </ul>	B
11	<b>Industria 4.0 – Realidad Aumentada</b> (Vaidya et al., 2018)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desarrollo hacia la Industria 4.0.</li> <li>• Nuevos desarrollos de tecnología.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Novedoso.</li> <li>• Requiere alto grado de inversión.</li> <li>• Requiere cambios importantes en las empresas.</li> </ul>	B-M

La heurística 1 se trata de una metodología diseñada para líneas *sequence* DST (*sequence dependence setup time*) con un operario por máquina. Coincide con la línea de fabricación que se quiere mejorar ya que los distintos procesos se van ajustando a medida que el paso anterior es ok y se cuenta con un operario por paso de proceso. No obstante, no aporta gran valor ya que la empresa tiene estas operaciones estudiadas, externalizadas y estandarizadas. No se ha indicado en el cronograma de arranque base (ilustración 10) pero para los cambios de utillaje necesarios en los procesos 1 y 3, operaciones previas de pre-ensamblajes han sido realizadas con anterioridad fuera de la línea.

Se le da un interés medio ya que puede ser interesante volver a analizar todas las operaciones para intentar externalizar más aún los procesos.

El HGA está diseñado para líneas de fabricación *sequence* DST y resulta una metodología novedosa ya que utiliza algoritmos genéticos mejorados. La implantación de una metodología de este tipo requiere un conocimiento previo sobre la programación de algoritmos genéticos y una planta de fabricación lista para ello, es decir, con un desarrollo de Big Data importante. Dada la tendencia a evolucionar hacia esos campos (“BBVA-Next-Technologies-radar-tecnologia.pdf,” n.d.) se indica con un interés medio (pero tendría que ser a largo plazo).

La tercera técnica está diseñada también para líneas *sequence* DST, pero no propone innovaciones. A pesar de ello resulta interesante ya que muchas veces se encuentran fallos a nivel básico de organización. En este caso se le da un grado de interés bajo ya que la empresa cuenta con un sistema 5S (“Las ‘5 eses’ para ser más productivo · Seiri, Seiton, Seiso, Seiketsu y Shitsuke,” 2016) implementado en toda la fábrica, pero tiene bases de datos descentralizadas.

La mejora continua es necesaria, pero en fábricas con máquinas muy avanzadas y desarrolladas (como es el caso) no es tan fácilmente aplicable ni causa tanto impacto en los tiempos ya establecidos. Requerirían un capital de inversión alto para, por ejemplo, la compra de más adaptadores de utillaje de prensas o de máquinas tridimensionales adicionales para los laboratorios.

Dado que la mejora continua es uno de los pilares del TPM se le da un interés medio (pero podríamos considerar esta metodología ya aplicada en la empresa) a la heurística 4.

Respecto a la heurística 5, el indicador OEE sólo sirve para definir el problema. Se trata de un indicador que ayuda a cuantificar la eficiencia y productividad, pero su implantación no sirve de mejora. Se considera de interés bajo ya que la empresa ya utiliza este indicador para identificar los puntos débiles a atacar de la línea productiva.

El método desarrollado por Kemal Karasu et al. permite atacar los problemas relevantes que aporten una mejora significativa y se trata de una metodología en la que el diseño de experimentos es relativamente fácil. Mediante una buena planificación y análisis de los factores influyentes en las variables a optimizar junto con el menor número de experimentos posibles se puede lograr mejorar los arranques significativamente. Además, al utilizar métodos estadísticos se pueden respaldar las hipótesis y verificar con valores. Se pondera con interés alto ya que para el desarrollo de un sistema de arranque óptimo será necesario realizar ensayos y distintas pruebas de sistemas propuestos y esta metodología puede ayudar a reducir el tiempo total de las pruebas.

El estudio de los cambios eco eficientes se trata de un sistema difícil de implementar ya que son mejoras indirectas con resultados menos “visibles”. No obstante, resulta de un gran impacto ético y es necesario tenerlo en cuenta. A pesar de que uno de los objetivos de este proyecto es la reducción de uso de papel durante el arranque de línea se le da un interés bajo a esta heurística ya que se centran más en aspectos ambientales distintos.

Liu et al. también tratan ajustes del tipo *state-dependent setup time*. Es novedoso y utiliza algoritmos genéticos mejorados. Es de un interés alto ya que en vez de utilizar dependencias de secuenciación usan estados. Cómo se vio en el sistema de arranque base parte de las operaciones dependen del estado del lote actual por lo que sería interesante utilizar algoritmos genéticos orientados hacia esta vía.

La heurística 9 da una perspectiva diferente al resto de ya que se basa en el análisis de comportamientos de recursos humanos mediante la utilización de



algoritmos MBO (*migrating birds optimization*) mejorados. Sirve tanto para operaciones del tipo *sequence* DST como PFS. Su aplicación es complicada ya que el factor humano es más complejo de controlar y dado la distribución 5S con la que cuenta la planta de producción mejoras significativas serían alcanzables bajo un gran esfuerzo. La optimización de flujos humanos se cree bastante completa, es por ello que se la considera de interés medio.

El Lean Manufacturing (técnica 10) es una práctica cada vez más extendida y se basan en el uso de ayudas visuales para incrementar la motivación. Es de bajo interés ya que la empresa ya utiliza ayudas visuales, por ejemplo, paneles informativos con los indicadores, reclamaciones, formaciones, mejoras presentadas...

La implantación de realidad aumentada en la empresa sería de gran utilidad ya que durante los ajustes de línea cualquier operario podría contar con formaciones, manuales y explicaciones de forma instantánea utilizando unos accesorios, tipo unas gafas de realidad aumentada. El problema es la gran inversión necesaria para su desarrollo. Y que no todas las empresas se encuentran preparadas para entrar en el mundo de la Industria 4.0. Se requiere trabajo previo de fondo y explotación de datos es por ello que se considera de bajo-medio interés.

Se puede decir que las tendencias para la mejora de tiempos de arranque se centran en el uso de algoritmos genéticos mejorados. Con metodologías fuertes y con buenos resultados, pero de difícil implantación si no se cuenta con la tecnología, conocimiento y capital necesario.

Se observa también como es muy importante el uso de herramientas Lean, bases de datos centralizadas y en general, una buena gestión de los datos generados.

Tras el análisis crítico y teniendo en cuenta cuáles son los puntos débiles del sistema de arranque a mejorar los cuales serán comunes en muchas empresas (tiempos de medición de los ciclos de control, comunicación entre departamentos, esperas por toma de decisión que se traducen en una mala comunicación del know-how...) se detecta una falta de estudios relacionados con la mejora de toma de decisiones. Como reducir tiempos de arranques de

empresas con sistemas TPM, 5S, *kaizen* ... ya implantados (en el sector de la automoción es lo común) mediante la explotación del conocimiento adquirido, del propio know-how empresarial, del proceso productivo.

La falta de transmisión del conocimiento o de un fácil acceso ralentiza la toma de decisiones, así como la autonomía de los trabajadores.

Tras este análisis del estado de la técnica actual se procede al desarrollo de la metodología y sistema de arranque propuestos.

## 6. Metodología

Para desarrollar un sistema de arranque optimizado que permita el arranque de la línea en el menor tiempo posible y por tanto incrementando la disponibilidad de la línea se decide explotar los puntos débiles identificados por la misma empresa.

Estos consisten en largos tiempos dedicados al control y medición de los ciclos de control y paradas largas por espera de decisiones debido a la falta de conocimiento y autonomía del operario a “pie de obra”.

Se toma como ejemplo la metodología Delphi en el que un panel de expertos es cuestionado de forma anónima para identificar una serie de variables (Custer et al., 1999) .

Este método cuenta con las siguientes fases:

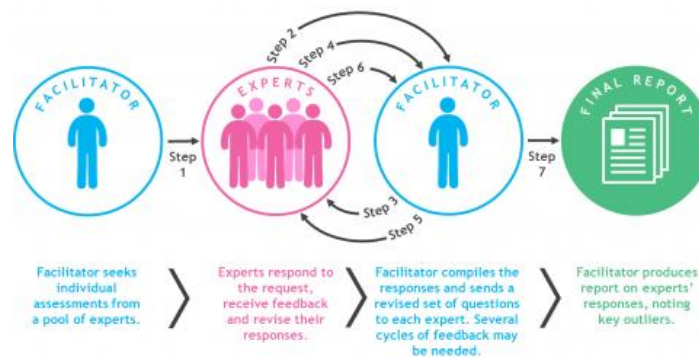


Ilustración 28 - Fases del método Delphi (University of Phoenix Research Hub, s.f.)

El facilitador selecciona a un panel de expertos que serán los encargados de responder a un cuestionario que luego el facilitador analizará y enviará los resultados. Iterando las veces necesarias hasta obtener un informe final.

En este proyecto se hará una adaptación de esta metodología para sacar provecho de todo el conocimiento adquirido por la empresa tras tantos años fabricando sus productos. Conocen el comportamiento de las piezas que fabrican, así como sus máquinas.

Para el panel de expertos se selecciona a los distintos jefes de línea (la empresa cuenta con un sistema de 3 turnos diarios y una rotación de líneas por lo que para la línea en cuestión hay 9 posibles jefes de línea), se consulta con el responsable del laboratorio de calidad para que proponga a 4 técnicos que se

dediquen a la medición de las referencias que se producen en dicha línea y se escoge también a los ingenieros del departamento de oficina técnica encargados del diseño y cálculo de las piezas que se fabrican.

Se escoge a estas personas (un total de 16 personas) en base a sus conocimientos técnicos de las piezas. Se trata de un grupo multidisciplinar ya que cuenta con trabajadores de diferentes departamentos, puestos y titulaciones.

Para reducir los tiempos de espera por las mediciones completas del ciclo de control se sabe que ciertas características son las que dominan cada proceso, es decir, algunas características son más relevantes que otras y una vez están en medida la pieza saldrá ok. El resto de las características secundarias son fácilmente ajustables en el proceso al que pertenecen independientemente de lo que suceda aguas arriba o aguas abajo.

Se consulta al panel de expertos por aquellas características principales y además se revisan los límites superiores e inferiores de control.

Cada uno de ellos revisa las características e indican cuáles cree que deberían ser las principales y las que caracterizan la parte del proceso dependiente. Los jefes de línea se apoyan en su conocimiento y experiencia con arranques de línea previos en los que han tenido que reajustar procesos muchas veces y saben que hay ciertos parámetros muy fáciles de ajustar y otros que en cambio requieren mucho tiempo e incluso cambio de utillaje en pasos previos.

Tras un consenso entre todo el panel de expertos se obtienen una serie de características que hay que medir y revisar primero. El ciclo de control completo deberá ser controlado igualmente ya que dichas características caracterizan a la pieza en su paso de proceso y es necesario que estén controladas.

Las distintas etapas se pueden resumir de acuerdo con la ilustración 23.

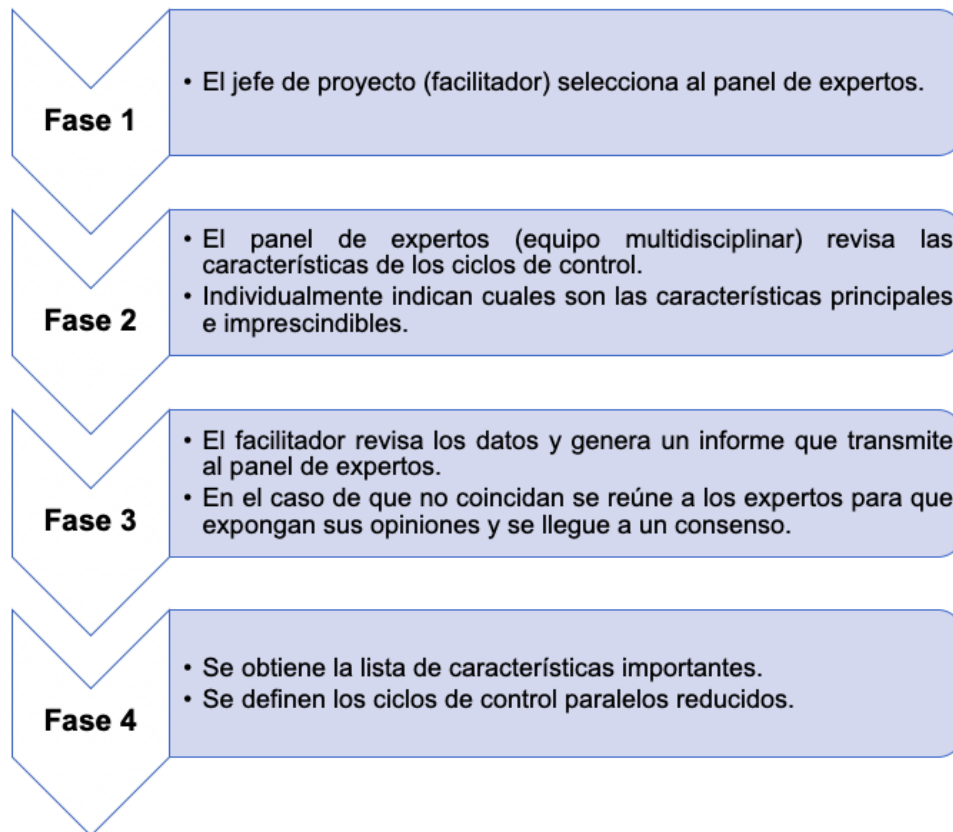


Ilustración 29 - Fases de la metodología propuesta

No obstante, al tener esta lista reducida se puede hacer un “lote 0” de la preserie, es decir, de las 200 piezas que se hacen para comprobar el proceso durante el arranque de línea se podrán adelantar 50 piezas midiendo un protocolo de calidad reducido con las cotas definidas por el panel de expertos.

Esto permitirá que el ajuste de procesos posteriores no tenga que esperar por la medición del protocolo completo y pueda comenzar antes, reduciendo así el tiempo total de ajuste de línea. En el primer proceso se harán las 200 piezas, pero a partir del proceso 2 tendremos dos lotes separados, uno con 50 que será el lote 0 para el ajuste rápido y otro con las 150 piezas restantes que servirán para documentar el arranque completo.

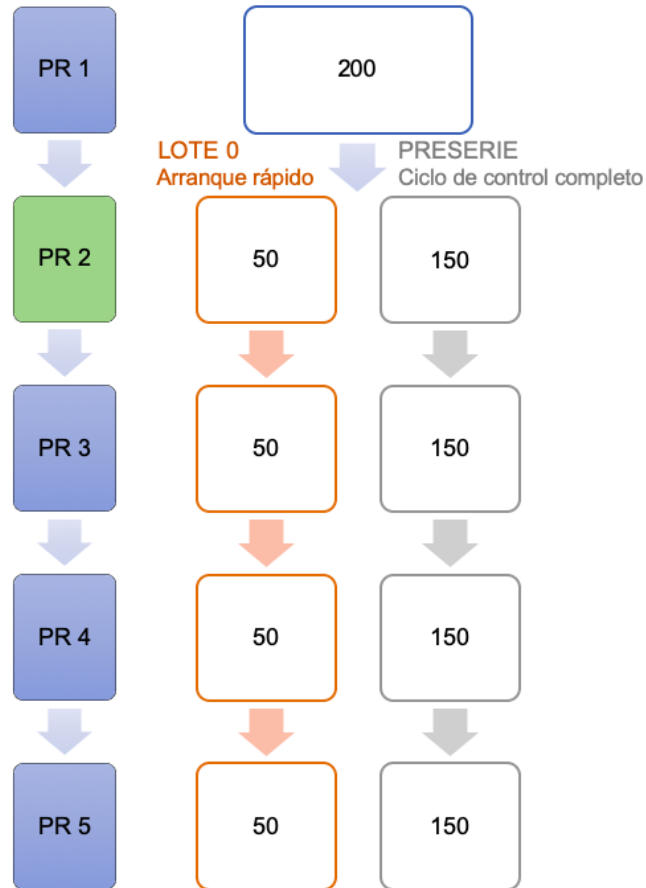


Ilustración 30 - Piezas para el arranque de línea

Se crean unos ciclos de control en los que se especifiquen las características a medir en la preserie y en el lote 0. Además, se crea una base de datos que permita al jefe de equipo desde su ordenador en la línea saber en tiempo real y de una forma muy visual cuando los protocolos van saliendo ok y puede avisar al operario del paso siguiente que puede comenzar con sus tareas.

## 7. Sistema de Arranque Propuesto – “Arranque Rápido”

Tras la revisión de los ciclos de control por el panel de expertos, el departamento de calidad revisa los ciclos de control y se añade una columna nueva indicando las características a medir en el lote 0 para adelantar tiempos de ajuste de máquinas en procesos posteriores.

Se trata de una estructura similar a la inicial, pero el muestreo sería menor ya que la documentación completa del arranque se sigue haciendo con todas las características y cantidades definidas. Este lote 0 sirve únicamente de referencia para ir avanzando con las tareas de ajuste.

Paso de proceso		Pieza		Código		Cliente		Edición		(Fecha)		LOGO EMPRESA
(tipo de proceso)		(tipo)		(XXXX)		(X)		Revisión		(X)		
PROCESO 1					ARRANQUE			LOTE 0			INSPECCIÓN	
SPC	Especificación	U	LSC	LIC	Muestra	Sist. Med.	Nivel	Muestra	Sist. Med.	Nivel	Registro	
S	Característica 1	mm	(x)	(x)	5	(x)	2	2	(x)	2	BDD	
N	Característica 2	mm	(x)	(x)	5	(x)	2				BDD	
N	Característica 3	mm	(x)	(x)	5	(x)	2	2	(x)	2	BDD	
N	Característica 4	mm	(x)	(x)	5	(x)	2				BDD	
N	Característica 5	mm	(x)	(x)	1	(x)	2				BDD	
N	Característica 6	mm	(x)	(x)	5	(x)	2				BDD	
N	Característica 7	mm	(x)	(x)	1	(x)	2				BDD	
N	Característica 8	-	(x)	(x)	1	(x)	2				BDD	
N	Característica 9	-	(x)	(x)	1	(x)	2				BDD	
N	Característica 10	-	(x)	(x)	1	(x)	2	1	(x)	2	BDD	
N	Característica 11	g/cm3	(x)	(x)	1	(x)	2	1	(x)	2	BDD	
N	Característica 12	g/cm3	(x)	(x)	1	(x)	1	1	(x)	1	BDD	
N	Característica 13	mm	(x)	(x)	1	(x)	1	1	(x)	1	BDD	

SPC: Características para control de proceso estad	LSC: límite superior de control
Nivel 1: Producción	LIC: límite inferior de control
Nivel 2: Calidad	

Elaborado	Autorizado
(firma)	(firma)

Ilustración 31 - Ciclo de control propuesto del proceso 1

Paso de proceso	Pieza	Código	Cliente	Edición	(Fecha)	LOGO EMPRESA					
(tipo de proceso)	(tipo)	(XXXX)	(X)	Revisión	(X)						
PROCESO 2				ARRANQUE			LOTE 0			INSPECCIÓN	
SPC	Especificación	U	LSC	LIC	Muestra	Sist. Med.	Nivel	Muestra	Sist. Med.	Nivel	Registro
N	Característica 1	-	(x)	(x)	1	(x)	1				BDD
N	Característica 2	%C	(x)	(x)	1	(x)	2				BDD
N	Característica 3	%C	(x)	(x)	1	(x)	2				BDD
N	Característica 4	%C	(x)	(x)	1	(x)	2	1	(x)	2	BDD
N	Característica 5	-	(x)	(x)	1	(x)	2	1	(x)	2	BDD
N	Característica 6	-	(x)	(x)	1	(x)	2	1	(x)	2	BDD
N	Característica 7	-	(x)	(x)	5	(x)	1	2	(x)	1	BDD
N	Característica 8	g/cm3	(x)	(x)	1	(x)	2				BDD

SPC: Características para control de proceso estad	LSC: límite superior de control
Nivel 1: Producción	LIC: límite inferior de control
Nivel 2: Calidad	

Elaborado	Autorizado
(firma)	(firma)

Ilustración 32 - Ciclo de control propuesto del proceso 2



Paso de proceso	Pieza	Código	Cliente	Edición	(Fecha)	LOGO EMPRESA					
(tipo de proceso)	(tipo)	(XXXX)	(X)	Revisión	(X)						
PROCESO 3				ARRANQUE			LOTE 0			INSPECCIÓN	
SPC	Especificación	U	LSC	LIC	Muestra	Sist. Med.	Nivel	Muestra	Sist. Med.	Nivel	Registro
S	Característica 1	mm	(x)	(x)	3	(x)	2	2	(x)	2	BDD
N	Característica 2	mm	(x)	(x)	3	(x)	2				BDD
N	Característica 3	mm	(x)	(x)	3	(x)	2				BDD
N	Característica 4	mm	(x)	(x)	3	(x)	2				BDD
N	Característica 5	mm	(x)	(x)	3	(x)	2				BDD
N	Característica 6	mm	(x)	(x)	3	(x)	2				BDD
N	Característica 7	-	(x)	(x)	5	(x)	1				BDD
N	Característica 8	-	(x)	(x)	5	(x)	1				BDD
N	Característica 9	-	(x)	(x)	1	(x)	2	1	(x)	2	BDD
N	Característica 10	mm	(x)	(x)	5	(x)	2	1	(x)	2	BDD
N	Característica 11	mm	(x)	(x)	5	(x)	2				BDD
N	Característica 12	-	(x)	(x)	1	(x)	1				BDD
N	Característica 13	-	(x)	(x)	1	(x)	2				BDD
N	Característica 14	g/cm3	(x)	(x)	1	(x)	2				BDD
N	Característica 15	g/cm3	(x)	(x)	1	(x)	2				BDD
N	Característica 16	g/cm3	(x)	(x)	1	(x)	2				BDD
N	Característica 17	g/cm3	(x)	(x)	1	(x)	2				BDD
N	Característica 18	mm	(x)	(x)	1	(x)	1	1	(x)	1	BDD
N	Característica 19	-	(x)	(x)	1	(x)	1				BDD
N	Característica 20	-	(x)	(x)	5	(x)	1				BDD
N	Característica 21	mm	(x)	(x)	1	(x)	2				BDD
N	Característica 22	mm	(x)	(x)	1	(x)	2				BDD
N	Característica 23	mm	(x)	(x)	1	(x)	2				BDD
N	Característica 24	mm	(x)	(x)	1	(x)	2				BDD
N	Característica 25	mm	(x)	(x)	1	(x)	2				BDD
N	Característica 26	mm	(x)	(x)	1	(x)	2	1	(x)	2	BDD
N	Característica 27	mm	(x)	(x)	1	(x)	2				BDD
N	Característica 28	mm	(x)	(x)	1	(x)	2				BDD

SPC: Características para control de proceso estad      LSC: límite superior de control  
 Nivel 1: Producción      LIC: límite inferior de control  
 Nivel 2: Calidad

Elaborado	Autorizado
(firma)	(firma)

Ilustración 33 - Ciclo de control propuesto del proceso 3

Paso de proceso (tipo de proceso)	Pieza (tipo)	Código (XXXX)	Cliente (X)	Edición Revisión	(Fecha) (X)	LOGO EMPRESA					
<b>PROCESO 4</b>		<b>ARRANQUE</b>			<b>LOTE 0</b>		<b>INSPECCIÓN</b>				
SPC	Especificación	U	LSC	LIC	Muestra	Sist. Med.	Nivel	Muestra	Sist. Med.	Nivel	Registro
S	Característica 1	mm	(x)	(x)	1	(x)	1	1	(x)	1	BDD
N	Característica 2	mm	(x)	(x)	1	(x)	1				BDD
N	Característica 3	mm	(x)	(x)	1	(x)	1				BDD
N	Característica 4	-	(x)	(x)	1	(x)	1				BDD
N	Característica 5	micra	(x)	(x)	1	(x)	1				BDD
N	Característica 6	-	(x)	(x)	1	(x)	1	1	(x)	1	BDD
N	Característica 7	-	(x)	(x)	1	(x)	1	1	(x)	1	BDD
N	Característica 8	mm	(x)	(x)	1	(x)	2				BDD
N	Característica 9	mm	(x)	(x)	1	(x)	2				BDD
N	Característica 10	mm	(x)	(x)	1	(x)	2				BDD
N	Característica 11	mm	(x)	(x)	1	(x)	2				BDD
N	Característica 12	mm	(x)	(x)	1	(x)	2				BDD
N	Característica 13	mm	(x)	(x)	1	(x)	2	1	(x)	2	BDD
N	Característica 14	mm	(x)	(x)	1	(x)	2				BDD
N	Característica 15	mm	(x)	(x)	1	(x)	2				BDD
N	Característica 16	mm	(x)	(x)	1	(x)	2	1	(x)	2	BDD
N	Característica 17	mm	(x)	(x)	1	(x)	2				BDD
N	Característica 18	°	(x)	(x)	1	(x)	2				BDD
N	Característica 19	mm	(x)	(x)	1	(x)	2				BDD
N	Característica 20	mm	(x)	(x)	1	(x)	2				BDD
N	Característica 21	mm	(x)	(x)	1	(x)	2				BDD
N	Característica 22	mm	(x)	(x)	1	(x)	2				BDD
N	Característica 23	mm	(x)	(x)	1	(x)	2				BDD
N	Característica 24	mm	(x)	(x)	1	(x)	2				BDD
N	Característica 25	mm	(x)	(x)	1	(x)	2				BDD
N	Característica 26	mm	(x)	(x)	1	(x)	2				BDD
N	Característica 27	mm	(x)	(x)	1	(x)	2				BDD
N	Característica 28	mm	(x)	(x)	1	(x)	2				BDD
N	Característica 29	mm	(x)	(x)	1	(x)	2	1	(x)	2	BDD
N	Característica 30	mm	(x)	(x)	1	(x)	2				BDD
N	Característica 31	mm	(x)	(x)	1	(x)	2				BDD

SPC: Características para control de proceso estad      LSC: límite superior de control  
 Nivel 1: Producción      LIC: límite inferior de control  
 Nivel 2: Calidad

<b>Elaborado</b>	<b>Autorizado</b>
(firma)	(firma)

Ilustración 34 - Ciclo de control propuesto del proceso 4

Paso de proceso	Pieza	Código	Cliente	Edición	(Fecha)	LOGO EMPRESA					
(tipo de proceso)	(tipo)	(XXXX)	(X)	Revisión	(X)						
PROCESO 5				ARRANQUE			LOTE 0			INSPECCIÓN	
SPC	Especificación	U	LSC	LIC	Muestra	Sist. Med.	Nivel	Muestra	Sist. Med.	Nivel	Registro
N	Característica 1	mm	(x)	(x)	5	(x)	1				BDD
N	Característica 2	mm	(x)	(x)	5	(x)	1				BDD
N	Característica 3	mm	(x)	(x)	5	(x)	2				BDD
N	Característica 4	-	(x)	(x)	1	(x)	2				BDD

SPC: Características para control de proceso estad	LSC: límite superior de control
Nivel 1: Producción	LIC: límite inferior de control
Nivel 2: Calidad	

Elaborado	Autorizado
(firma)	(firma)

Ilustración 35 - Ciclo de control propuesto del proceso 5

En el ciclo de control propuesto para el proceso 5 (ilustración 29) no hay ninguna característica indicada en el lote 0 ya que se trata de un proceso de empaquetado dónde solo hay inspecciones visuales. No tiene operaciones que afectan a la pieza y, además, es el último proceso por lo que no requerimos tener un protocolo reducido.

Tras aplicar estos cambios y crear los nuevos programas de medición para el lote 0 los tiempos empleados en el control de características se ven reducidos considerablemente (ver tabla 3).

Tabla 3 - Características totales de los ciclos de control por preserie y avanzadilla

CICLOS DE CONTROL REDUCIDOS				
PROCESO	Nº CARACTERÍSTICAS PRESERIE	TIEMPO TOTAL (min)	Nº CARACTERÍSTICAS LOTE 0	TIEMPO TOTAL (min)
1	13	55	6	30
2	8	105	4	50
3	28	150	5	65
4	31	315	6	165
5	4	30	0	0

Para eliminar los tiempos de comunicación entre el departamento de calidad y de producción, así como reducir el uso de papel y gestionar mejor la documentación del arranque se propone una base de datos común de fácil acceso y uso mediante la utilización de una plantilla de OneNote.

Se crea un libro de OneNote para la línea de producción que contiene la documentación de los arranques y además servirá para informar a la línea de producción del estado de las mediciones desde el laboratorio.

Cada vez que se inicie un arranque de línea, el jefe de línea será el encargado de crear una nueva página en la referencia correspondiente y rellenará los campos indicados en la primera tabla:

- Jefe de línea.
- Fecha y hora de inicio.
- Fecha y hora de fin.
- Incidencias.

El departamento de calidad será el encargado de ir cambiando el estatus de los procesos a medida que vayan obteniendo los resultados. Además, para evitar el gasto de papel y centralizar toda la información en una misma base de datos



virtual adjuntarán los protocolos con los resultados de las mediciones en la casilla correspondiente para que producción pueda consultarlos.

Esta base de datos servirá como histórico de los arranques y permitirá una fácil y rápida consulta en caso de que sea necesario revisar algún arranque.

ARRANQUES ▾	
Referencia XXXX (1)	Arranque Fabricación [YYYY...
Referencia XXXX (2)	Arranque Fabricación [YYYY...
Referencia XXXX (3)	Arranque Fabricación [YYYY...
Referencia XXXX (4)	

## Arranque Fabricación [YYYY-MM-DD] (1)

sábado, 29 de junio de 2019 19:13

<b>Jefe de línea</b>	
<b>Fecha y hora de inicio</b>	
<b>Fecha y hora de fin</b>	
<b>Incidencias</b>	

	PROCESO 1	PROCESO 2	PROCESO 3	PROCESO 4	PROCESO 5
<b>LOTE 0</b>					N/A
Protocolos de medición					
<b>PRESERIE</b>					
Protocolos de medición					

Ilustración 36 - Base de datos propuesta en OneNote para gestión de arranques

ARRANQUES ▾

Referencia XXXX (1) Arranque Fabricación [YYYY...]

Referencia XXXX (2) Arranque Fabricación [YYYY...]

Referencia XXXX (3) Arranque Fabricación [YYYY...]

Referencia XXXX (4)

IC Agregar sección Agregar página

### Arranque Fabricación [YYYY-MM-DD] (1)

sábado, 29 de junio de 2019 19:10

<b>Jefe de línea</b>	
<b>Fecha y hora de inicio</b>	
<b>Fecha y hora de fin</b>	
<b>Incidencias</b>	






	PROCESO 1	PROCESO 2	PROCESO 3	PROCESO 4	PROCESO 5
<b>LOTE 0</b>	OK	OK	En medición		N/A
<b>Protocolos de medición</b>	 XXXX_proto colo_3D_0	 XXXX_proto colo_3D_0			
<b>PRESERIE</b>	OK	OK			
<b>Protocolos de medición</b>	 XXXX_proto colo_3D	 XXXX_micro s   XXXX_proto colo_3D			

Ilustración 37 – Ejemplo de página de arranque en proceso



Tras la implantación del lote 0 el cronograma de arranque se modifica de la siguiente manera:

- Se incluyen las actividades de fabricación del lote 0 y la inspección de calidad para estas piezas.
- El tiempo de comunicación entre departamentos debido a los desplazamientos físicos para la recolección de protocolos impresos en papel pasaría a ser nulo.

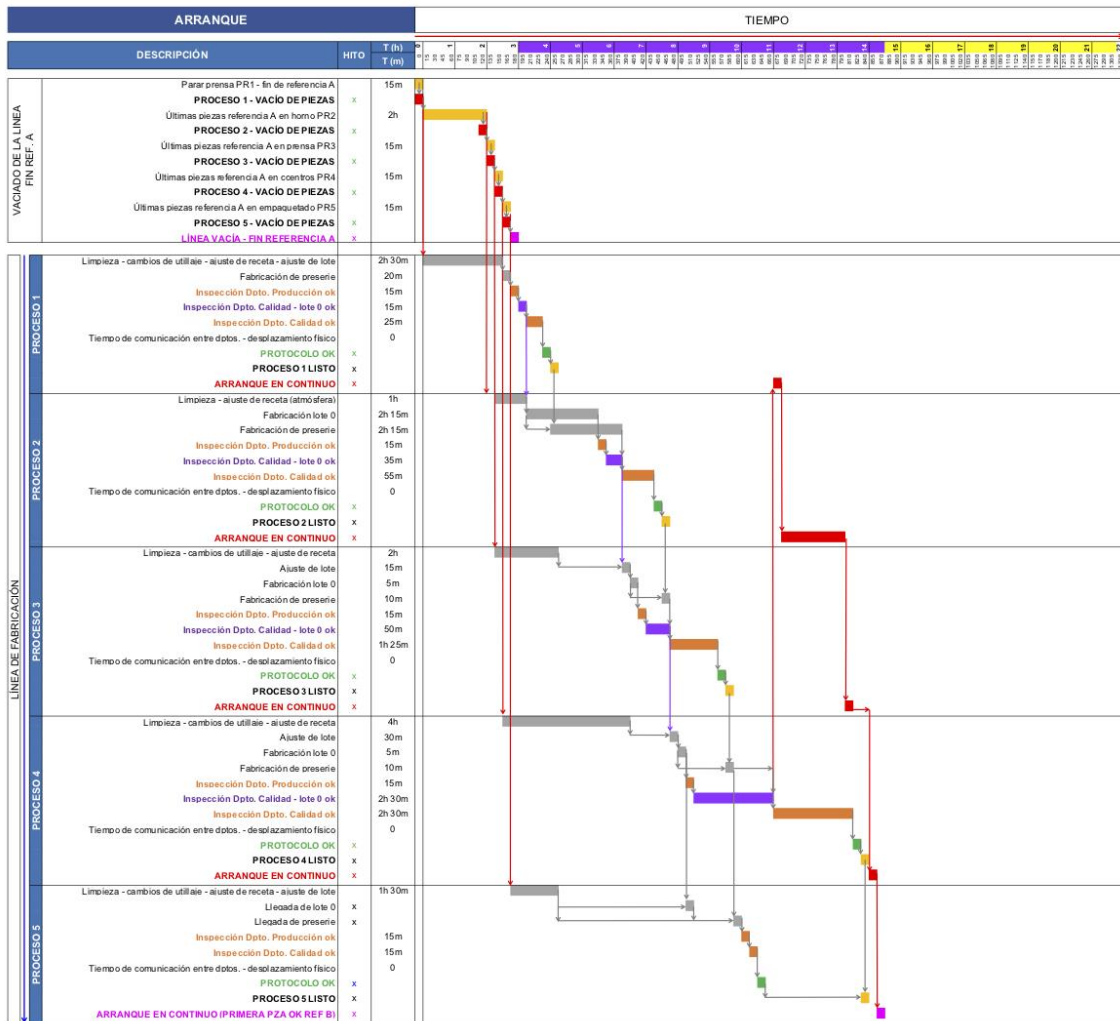


Ilustración 38 - Cronograma de arranque rápido de línea (propuesta) - completo

A continuación, se describe en detalle el sistema de arranque rápido propuesto.



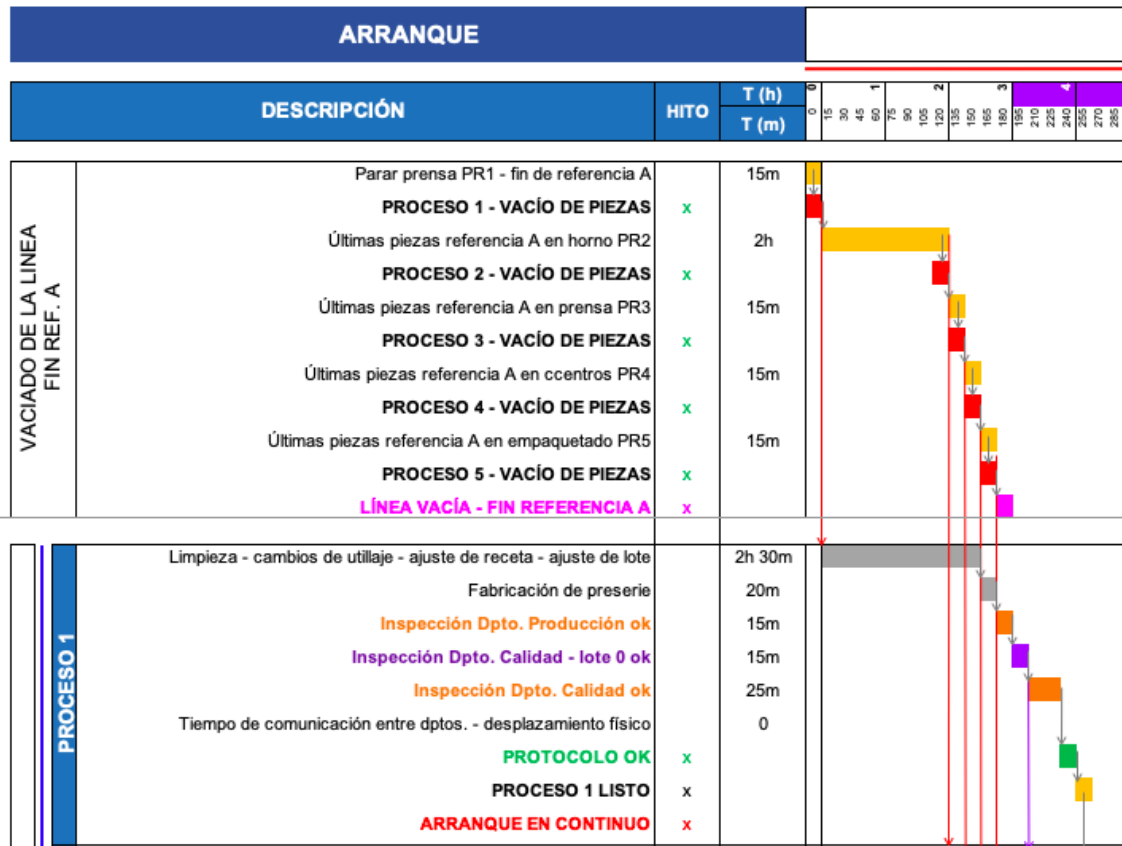


Ilustración 39 - Cronograma de arranque rápido de línea (propuesta) - proceso 1

El inicio del arranque rápido es igual al arranque descrito anteriormente ya que es necesario el vaciado de la línea de piezas de la referencia A antes de poder empezar el ajuste de cada proceso. A medida que las máquinas se vayan vaciando se podrá comenzar con los diferentes ajustes.

En el caso del primer proceso no se distinguen las fabricaciones del lote 0 y de la preserie ya que es el punto de partida de la línea. Se observa la primera variación en la inspección del ciclo de control por parte del dpto. de calidad. Deberán medir primero las características importantes indicadas en los ciclos propuestos y después continuar con el resto del arranque oficial. Una vez el lote 0 sea ok y esté publicado y en verde en la base de datos propuesta el dpto. de producción lo verá desde la línea de fabricación y podrá comenzar con el ajuste del siguiente proceso.

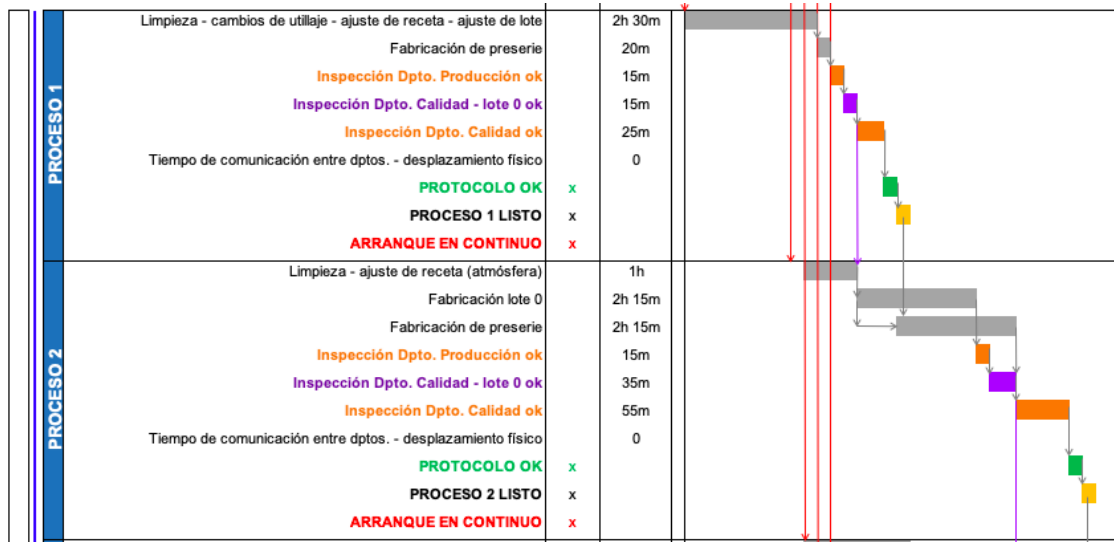


Ilustración 40 - Cronograma de arranque rápido de línea (propuesta) - proceso 2

Durante el proceso 2, se distinguen las fabricaciones del lote 0 y la preserie en dos tandas. Se han podido avanzar las 50 piezas del lote 0 tras las mediciones iniciales. Una vez estas piezas están hechas se revisan por producción y posteriormente en el laboratorio de calidad. Cuando el ciclo de control del lote 0 esta terminado y es ok, el resto de las piezas de la preserie ya estarán también hechas, se continuará con la medición del resto de arranque. El ajuste del siguiente proceso ha comenzado con la parte del ciclo de control ok del lote 0.

Dado que no se han incrementado los recursos humanos ni materiales cabe destacar que los ciclos de control de un mismo proceso (ya sean del lote 0 o de la preserie) no pueden ser medidos simultáneamente si no que uno detrás de otro. En este caso no tenemos ningún problema ya que los tiempos de las distintas tareas coinciden perfectamente.

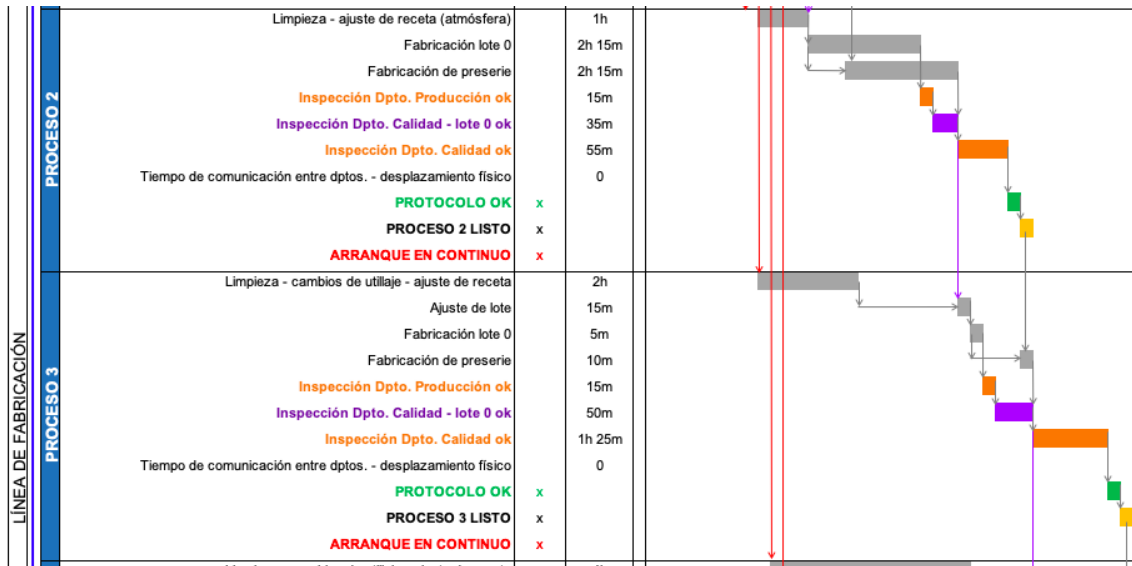


Ilustración 41 - Cronograma de arranque rápido de línea (propuesta) - proceso 3

El proceso 3 comienza su ajuste por lote con el protocolo del lote 0 del proceso 2 ok. En este proceso se puede observar como la fabricación de la preserie tiene que esperar hasta la confirmación del ciclo de control de la preserie del proceso anterior. Esto no ralentiza el arranque ya que mientras el proceso 2 acaba de verificarse hemos avanzado con el lote 0 en el proceso 3.

Los ciclos de control de ambos procesos, en el proceso 2 el de la preserie y en el proceso 3 el del lote 0, pueden ser medidos simultáneamente ya que se miden características diferentes con distintas máquinas.

En estos últimos dos pasos de proceso hemos podido observar también como los tiempos de inspección de calidad de la preserie se han reducido ya que al haber medido previamente parte de las características con el lote 0 estas no tienen que volver a ser medidas (sólo en el caso de algunas, deben medir más piezas por el muestreo indicado) y pueden utilizar las ya hechas.

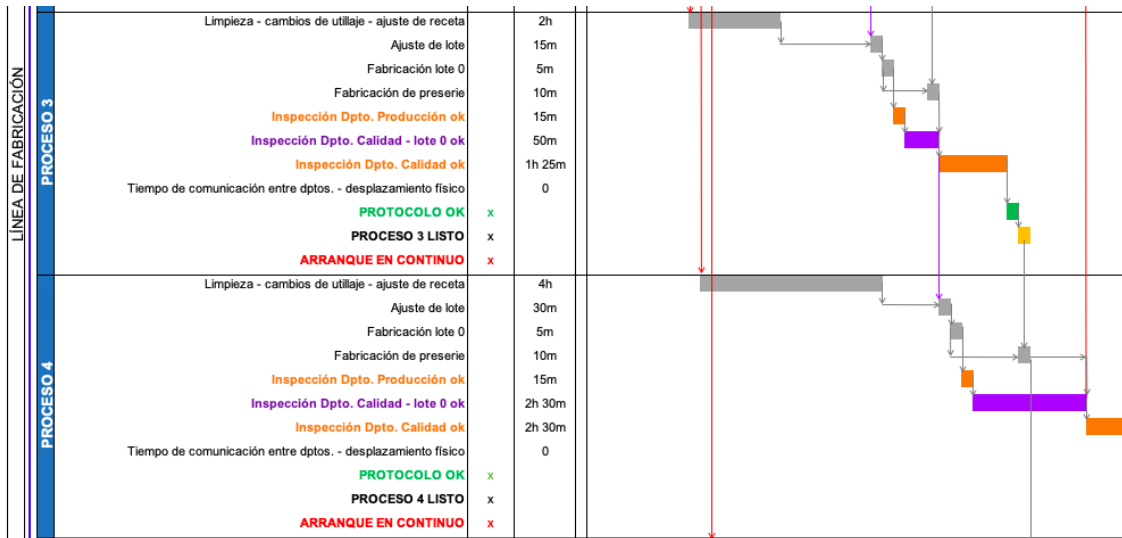


Ilustración 42 - Cronograma de arranque rápido de línea (propuesta) - proceso 4

El proceso 4 al igual que el proceso 3 puede empezar antes su ajuste por lote. En el momento en el que tenemos el ciclo de control del lote 0 como ok se puede arrancar de continuo el proceso 1. Con las características principales del proceso 4 aseguradas no se necesita esperar hasta tener el ciclo de control del proceso 4 completo para poder arrancar la línea.

El resto de procesos van arrancando según van llegando las piezas. Pero cuando llegan al proceso 4 se debe esperar hasta tener el arranque entero documentado y ok. Para asegurar que todas las características de ese proceso están 100% ok.

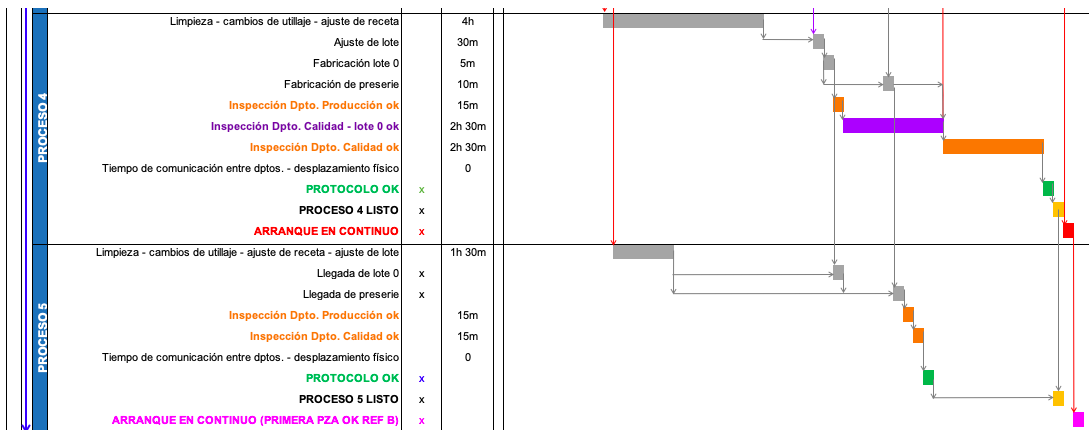


Ilustración 43 - Cronograma de arranque rápido de línea (propuesta) - proceso 5

El arranque del proceso 5 tiene un comportamiento especial. Las piezas tanto del lote 0 como de la preserie llegan cuando nada más salen del proceso 4 y se hacen las inspecciones correspondientes que son visuales y se da el protocolo

ok. Al ser el último proceso no hay una inspección específica para el lote o, no es necesaria. Pero el proceso no se puede dar por listo hasta que el proceso 4 es ok.

Una vez llega la primera pieza de la referencia B cuando se ha arrancado la línea de continuo damos por finalizado el arranque de línea, arranque rápido de línea.

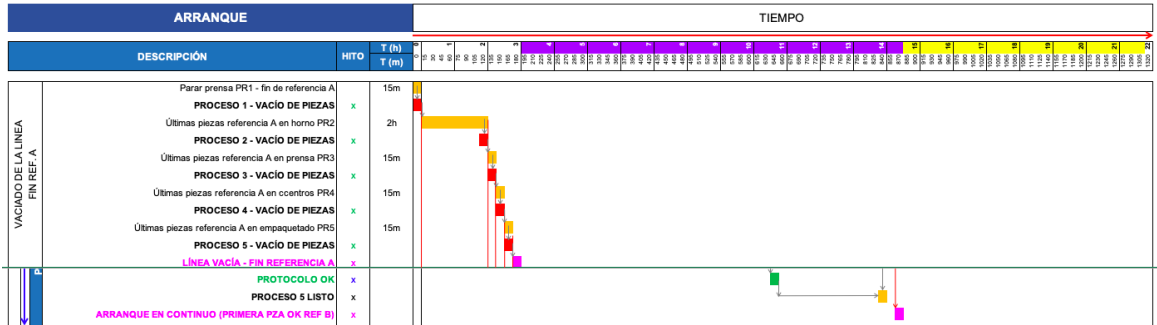


Ilustración 44 - Cronograma de arranque rápido de línea (propuesta) - tiempo total

El tiempo total empleado en ajustar la línea de fabricación mediante el nuevo diseño propuesto de arranque rápido es de 11 horas y 30 minutos (690 minutos). El arranque inicial era de 18 horas y 45 minutos por lo que se ha conseguido una **reducción de 7 horas y 15 minutos** con el sistema de arranque rápido.

## 8. Validación

El sistema de arranque rápido propuesto no ha podido ser probado todavía. Para validar la metodología seguida y el sistema propuesto se seguirá el siguiente flujo de actividades:

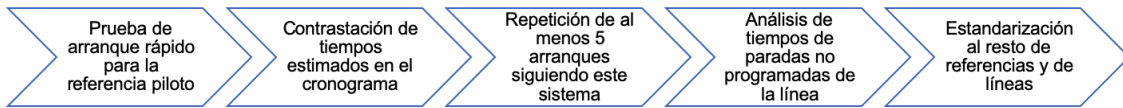


Ilustración 45 - Validación de metodología y sistema propuestos

En primer lugar, se deberá probar la referencia piloto revisada y contrastar los tiempos empleados con los estimados en el cronograma de arranque rápido. Tras esta primera prueba se deberá decidir si es necesario revisar nuevamente los ciclos de control o si son válidos ya.

Para validar el arranque rápido se repetirá dicho arranque en 5 arranques diferentes de la referencia piloto. Estos arranques deberán ser “normales”, es decir, no presentar incidencias fuera de las usuales como por ejemplo averías de máquinas, falta de personal, tiempos de espera por saturación de laboratorio, etc.

Una vez se hayan realizado estos arranques se revisarán los tiempos de paradas no programadas asociados a esta referencia piloto para verificar que han disminuido aquellas que se encontraban en el top 3 (ilustración 6) o que incluso hayan desaparecido del top 3.

Esto indicará que la metodología empleada y el sistema de arranque propuestos cumplen sus objetivos y deberán ser estandarizados y extendidos al resto de referencias de la línea de fabricación piloto. Y posteriormente, al resto de líneas de fabricación de toda la planta productiva.

Mediante la implantación de esta metodología y sistema de arranque rápido se espera conseguir un aumento de la disponibilidad de 65% a 83%.

Esto supondría un ahorro en los costes de línea y un aumento de los beneficios de la empresa ya que se disminuirían las horas de líneas paradas que solo implican gastos y se aumentarían las horas productivas que generan valor y por tanto beneficio.

Un porcentaje de disponibilidad del 83% modificaría la ecuación de costes totales de paradas (ecuación 1) de la siguiente forma:

$$Y (h) = \frac{27}{100} \times Z (h) \times 600 \left( \frac{\text{€}}{h} \right) = 162 \times Z (\text{€})$$

*Ecuación 2 - Coste total de paradas no programadas con un 83% de disponibilidad*

La constante 210 por la que se multiplican las horas planificadas de producción pasaría a ser 162.

**Se disminuirían los costes de la línea por paradas en un 33%.**

Y se alcanzaría el objetivo de tener un OEE de línea del 70% que, manteniendo la velocidad actual, permite cumplir con los pedidos previstos de 2020.

Durante la validación del diseño se deben tener en cuenta los posibles riesgos que puedan ocurrir. Cada arranque de fabricación es único y existen demasiados factores que causan influencia, negativa o positiva, en ellos. Es por ello por lo que si tras 5 meses sin arranques normalizados de la referencia piloto sea necesario extender el proyecto piloto a otra referencia para así poder validar el sistema en la mayor brevedad posible para empezar el ahorro de costes.

En caso de que el sistema no fuese válido o fuesen necesarios muchos *loops* de mejora se deberá revisar la metodología planteada por si se debiese actualizar.

## 9. Conclusiones

La metodología propuesta permite sacar provecho de todo el know-how que existe en una empresa. A través de un panel de expertos gestionado de forma correcta es posible analizar y mejorar los sistemas ya existentes. No supone un alto coste ya que pretende optimizar los recursos propios, tanto de conocimiento como de maquinaria.

Es de fácil implantación ya que no requiere una formación específica ni unos equipos informáticos particulares. Además, puede extrapolarse a otras problemáticas de la empresa que estén asociadas a una gestión pobre o sobresaturada.

El sistema de arranque rápido permite optimizar los tiempos del laboratorio de calidad. Ya que los nuevos ciclos de control propuestos distinguen las características más importantes de la pieza en cada paso de proceso y lo prioriza frente a aquellas otras que son fácilmente ajustables en la línea sin depender de los procesos aguas arriba o aguas abajo. Y no sólo eso, sino que también el uso de estos ciclos de control permite a los técnicos de laboratorio ganar más conocimiento respecto de las piezas fabricadas y sus procesos. Pueden de esta forma, saber que procesos tienen mayor relevancia sobre las características finales de la pieza.

Este sistema de arranque permite además comenzar los trabajos de ajustes específicos de máquina mucho antes consiguiéndose una reducción del tiempo total del arranque teórico de 7 horas y 15 minutos (de 18 horas y 45 minutos a 11 horas y 30 minutos) lo que se traduce en una mejora del tiempo de ajuste de línea de 39.7 %. Reduciendo los costes totales por línea parada en un 33%.

Parte de la disminución de tiempos se debe también a la implementación de una base de datos para la mejora de la gestión de información (protocolos de medición) generados durante el arranque. Además de aumentar la disponibilidad de la línea y de obtener un mayor control de la documentación, se consigue mejorar la comunicación entre los distintos departamentos. Esto es un aspecto muy positivo ya que fomenta el trabajo en equipo y por tanto mejorará el desempeño de todos los trabajadores.





Es importante destacar también que este sistema de arranque es más sostenible con el medio ambiente ya que se ha eliminado el alto gasto de papel. Es más, no sólo reduce el uso de papel reduciendo los gastos en material de oficina sino que también libera espacio físico de almacenaje de las carpetas físicas dónde se almacenaba toda esta información.

## **10. Líneas Futuras de Investigación**

La optimización de arranque de líneas de producción es un tema aún poco estudiado e investigado (Godina et al., 2018) en el que existe mucho campo donde realizar innovaciones y nuevos desarrollos por lo que realizar estudios en este ámbito, a priori, parece adecuado.

Además, se trata de un tema con una aplicación directa en la industria (no sólo en el sector de la automoción, sino también en cualquier sector con un proceso de fabricación en línea) con un alto interés económico. Por tanto, sería reactivamente sencillo conseguir financiación y sponsors.

Tras el estado del arte realizado se identifica la falta de estudios relacionados con la optimización de línea focalizada en la mejora de la gestión de recursos humanos y del aprovechamiento del conocimiento aprendido por las empresas.

Este estudio pretende ampliar el conocimiento en esa área, pero se sigue percibiendo una gran falta de avances de este tipo.

Con los nuevos caminos que se están tomando en las industrias hacia la Industria 4.0 y el *machine learning* sería interesante adaptar la metodología propuesta de tal forma que el panel de expertos fuesen las propias máquinas y procesos. Hay un amplio campo de estudio pendiente en este ámbito.

## **11. Bibliografía y Referencias**

BBVA-Next-Technologies-radar-tecnologia.pdf, n.d.

Custer, R.L., Scarcella, J.A., Stewart, B.R., 1999. The Modified Delphi Technique--A Rotational Modification. *J. Vocat. Tech. Educ.* 15.

Dettmer, H. W. (1997). *Goldratt's Theory of Constraints. A systems approach for Continuous Improvement*. Milwaukee: ASQ Quality Press.

Duman, E. U. (2012). Migrating birds optimization: A new matheuristic approach and its performance on quadratic assignment problem. *Information Sciences*, 65-77.

Ferradás, P.G., Salonitis, K., 2013. Improving Changeover Time: A Tailored SMED Approach for Welding Cells. *Procedia CIRP*, Forty Sixth CIRP Conference on Manufacturing Systems 2013 7, 598–603. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.039>

Godina, R., Pimentel, C., Silva, F.J.G., Matias, J.C.O., 2018. A Structural Literature Review of the Single Minute Exchange of Die: The Latest Trends. *Procedia Manuf.*, 28th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM2018), June 11-14, 2018, Columbus, OH, USAGlobal Integration of Intelligent Manufacturing and Smart Industry for Good of Humanity 17, 783–790. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.129>

Gungor, Z.E., Evans, S., 2015. Eco-effective Changeovers; Changing a Burden into a Manufacturing Capability. *Procedia CIRP*, 12th Global Conference on Sustainable Manufacturing – Emerging Potentials 26, 527–532. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.07.183>

Hansen, R. C. (2001). *Overall Equipment Effectiveness: A Powerful Production/Maintenance Tool for Increased Profits*. Industrial Press.

ICEX. (02 de Abril de 2018). *Invest in Spain*. Recuperado el 22 de Febrero de 2019, de <http://www.investinspain.org/invest/es/sectores/automocion/descripcion/index.html>

Karam, A.-A., Liviu, M., Cristina, V., Radu, H., 2018. The contribution of lean manufacturing tools to changeover time decrease in the pharmaceutical industry. A SMED project. *Procedia Manuf.*, 11th International Conference Interdisciplinarity in Engineering, INTER-ENG 2017, 5-6 October 2017, Tirgu Mures, Romania 22, 886–892. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.125>

Kemal Karasu, M., Cakmakci, M., Cakiroglu, M.B., Ayva, E., Demirel-Ortabas, N., 2014. Improvement of changeover times via Taguchi empowered SMED/case study on injection molding production. *Measurement* 47, 741–748. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.09.035>

Kumar, S.V., Mani, V.G.S., Devraj, N., 2014. Production Planning and Process Improvement in an Impeller Manufacturing Using Scheduling and OEE Techniques. *Procedia Mater. Sci.*, International Conference on Advances in Manufacturing and Materials Engineering, ICAMME 2014 5, 1710–1715. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.360>

Las “5 eses” para ser más productivo · Seiri, Seiton, Seiso, Seiketsu y Shitsuke, 2016. *Sist. OEE - Technol. Improve.* URL <https://www.sistemasoe.com/implantar-5s/> (accessed 6.29.19).

Liu, G.-S., Zhou, Y., Yang, H.-D., 2017. Minimizing energy consumption and tardiness penalty for fuzzy flow shop scheduling with state-dependent setup time. *J. Clean. Prod.* 147, 470–484. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.044>

Martinez, B., n.d. Kaizen La clave de la ventaja competitiva Japonesa.

OEE (Overall Equipment Effectiveness), 2016. . *Sist. OEE - Technol. Improve.* URL <https://www.sistemasoe.com/definicion-oe/> (accessed 6.24.19).

S. Palanisamy, S. S. (2013). Changeover Time Reduction and Productivity Improvement by Integrating Conventional SMED Method with Implementation of MES for Better Production Planning and Control. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, Vol. 2, Issue 12.

Shingo, S. (1985). *A revolution in manufacturing: The SMED System* . Cambridge: Productivity Press.

Sioud, A., Gagné, C., 2018. Enhanced migrating birds optimization algorithm for the permutation flow shop problem with sequence dependent setup times. *Eur. J. Oper. Res.* 264, 66–73. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.06.027>

Sioud, A., Gravel, M., Gagné, C., 2012. A hybrid genetic algorithm for the single machine scheduling problem with sequence-dependent setup times. *Comput. Oper. Res.* 39, 2415–2424. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.12.017>

Somos Toyota. (18 de Abril de 2017). *Toyota*. Recuperado el 22 de Febrero de 2019, de <https://www.toyota.mx/nota/sistema-de-producción-toyota-la-filosof%C3%ADa-empresarial-más-admirada>

The Statistics Portal. (2019). *Statista*. Recuperado el 22 de Febrero de 2019, de <https://www.statista.com/statistics/200002/international-car-sales-since-1990/>

University of Phoenix Research Hub. (s.f.). *University of Phoenix*. Obtenido de <https://research.phoenix.edu/content/research-methodology-group/delphi-method>

Vaidya, S., Ambad, P., Bhosle, S., 2018. Industry 4.0 – A Glimpse. *Procedia Manuf.*, 2nd International Conference on Materials, Manufacturing and Design Engineering (iCMMD2017), 11-12 December 2017, MIT Aurangabad, Maharashtra, INDIA 20, 233–238. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.034>