

La ciencia de la fabricación

La eficiencia de los procesos de fabricación se basa en leyes fundamentales de la física de las fábricas

Fredrik Nordström, Piotr Gawad, Adam Nowarski

El hombre ha sido “fabricante” desde que empezó a caminar por la tierra. Como es obvio, la fabricación ha evolucionado mucho desde sus inicios y sigue haciéndolo. Aparecen diferentes filosofías y nuevas palabras mágicas que parecen ser la respuesta a las súplicas de todo fabricante, para ser sustituidas poco después por nuevas y mejores filosofías y nuevas palabras de moda.

Aunque la mayor parte de las nuevas ideas contienen un núcleo de verdad, lo más importante es tener un profundo conocimiento de las leyes fundamentales que rigen los procesos de fabricación para aplicar las herramientas y filosofías apropiadas, combinadas de forma correcta y equilibrada. Dicho de otro modo, es necesario que comprendan la “ciencia de la fabricación”.

Qué se entiende por “ciencia de la fabricación”. De forma resumida, esta expresión se refiere a la física fundamental de un proceso específico de fabricación; no sólo los detalles, sino la estructura que hace que los componentes de una línea de producción funcionen conjuntamente, como un sistema. Los egipcios, por ejemplo, fueron expertos en aplicar las leyes de la física cuando construyeron las pirámides. Sin embargo, como la fabricación en serie y, por tanto, la velocidad, no eran cuestiones relevantes en aquella época, los egipcios no tuvieron que plantearse la dinámica de flujos que entra en juego cuando se habla de fabricación en serie de productos o de procesos continuos.

Para encontrar este fenómeno tenemos que dar un salto adelante, hasta la primera revolución industrial.

Hasta la mitad del siglo XVIII, los bienes se producían principalmente de uno en uno por artesanos expertos. Varios inventos contribuyeron por aquel entonces a que se produjera la llamada Revolución Industrial, cuando al generalizarse la mecanización de los sistemas de producción la manufactura manual doméstica pasó a convertirse en producción en fábricas a mayor escala.

El más importante de estos inventos fue la máquina de vapor (James Watt). El uso de la energía del vapor no sólo permitió situar las instalaciones industriales sin depender de la disponibilidad de energía hidráulica, sino que además proporcionó energía más barata, lo que permitió reducir los costes de producción y bajar los precios.

Otro invento muy importante lo hizo el armero Eli Whitney a finales del siglo XVIII (1799–1801) al introducir el concepto de piezas intercambiables, que hizo posible construir y reparar rápidamente los productos sin depender enteramente de la destreza de personas expertas. Se consiguió también cierto grado de uniformidad al disponer de máquinas y plantillas para construir las distintas piezas de una pistola. Es evidente que los cimientos de la cadena de montaje fueron puestos a principios del siglo XIX.

Otras importantes innovaciones tuvieron lugar en el transporte (ferrocarril) y en las comunicaciones (telégrafos), que contribuyeron a proporcionar los meca-

nismos de distribución necesarios para los productos y la información.

La moderna empresa industrial integrada empezó a tomar forma durante la llamada Segunda Revolución Industrial. En ese momento ya se disponía de todos los elementos necesarios para la fabricación en serie y la distribución en masa de productos.

La llegada de la fabricación en serie

La persona de Henry Ford estará para siempre asociada a la llegada de la producción de bienes, estandarizada y en masa, con máquinas especiales y líneas móviles de montaje. En 1913 Ford introdujo la cadena de montaje móvil en su fábrica de automóviles. La implantación de cintas transportadoras eliminó manipulaciones adicionales y tiempo de espera entre estaciones de trabajo. Ford dio vida a las ideas expresadas por Frederick Winslow Taylor en “Principios de la gestión científica” (1911), ya que creó un flujo continuo “llevando el trabajo al hombre” en lugar de “llevar el hombre al trabajo”. Éste fue, en rigor, el nacimiento de la *producción ajustada*, uno de cuyos principales centros de atención es la eliminación de desechos. Este procedimiento fue copiado y perfeccionado posteriormente por Taiichi Ohno y su equipo de la empresa Toyota.

Mirando las cosas con perspectiva, sin embargo, la introducción de la cinta transportadora como tal parece eclipsa-

da por el reconocimiento de la importancia estratégica de la velocidad por parte de Ford. Él comprendió que un proceso rápido tiene efectos positivos en cuanto a rendimiento e inventarios y que, por tanto, le permitiría tener costes más bajos que los de sus competidores.

Descubrimiento de la naturaleza de la variación

Mientras que Henry Ford reducía la variabilidad de los productos a un mínimo absoluto (sólo fabricaba coches negros) en sus esfuerzos por conseguir más rapidez de producción y reducir los costes, otros se concentraban en un ajuste fino del proceso como forma de mejorar la fiabilidad de los productos. Por ejemplo, los ingenieros de los laboratorios Bell de Western Electric experimentaron con varios ajustes de procesos buscando mejorar la calidad de sus sistemas de transmisión, con poco o ningún éxito. El estadístico Walter A. Shewhart llegó finalmente a la conclusión de que cualquier ajuste que se haga en un proceso para corregir fluctuaciones que estén dentro del nivel de variación aleatoria, no hará sino incrementar la variación en el proceso y, por consiguiente, degradar el rendimiento del mismo. En otras palabras, utilizar meramente la intuición y las buenas intenciones –el sistema de prueba y error– es como navegar por mares desconocidos sin contar con

Montaje de un generador en Baden, Suiza (1985)



Tendencias de la fabricación

mapas ni brújula. Sus resultados llevaron al nacimiento del control SPC¹⁾ (Statistical Process Control) específico de procesos, que posteriormente fue adaptado y mejorado por dos antiguos empleados de Western Electric, los doctores W. Edwards Deming y Joseph M. Juran.

El trabajo de Shewhart, publicado en 1931 bajo el título "Control Económico de la Calidad de Productos Manufacturados", fue una importante contribución científica a la disciplina de la fabricación.

Puede decirse que las modernas herra-

mientas de calidad de hoy día, como Six Sigma **Cuadro informativo 1**, se derivan directamente de estos resultados.

Reduccionismo frente a enfoque sistemático

En sus esfuerzos por desarrollar prácticas de gestión de fabricación, Frederick Winslow Taylor dividió el sistema de producción en partes más simples –reduccionismo– con el fin de mejorar cada una de ellas y maximizar la eficiencia. Desarrolló plantillas, accesorios y otros dispositivos para apoyar su objetivo de estandarizar prácticas idó-

neas, lo que le hizo ganar el título de "padre de la ingeniería industrial". Este enfoque reduccionista es excelente para analizar actividades individuales con las cuales se produce un elemento o un conjunto. Sin embargo, el objetivo de mejorar la eficiencia global debe centrarse, no en mejorar cada fase del proceso, sino más bien en la interacción de los componentes entre sí y con otros subsistemas para constituir el proceso completo de producción. La optimización del rendimiento se realiza entonces en función de los objetivos globales del sistema.

Cuadro informativo 1

Gestión de la variación, la perspectiva de la calidad

Un moderno proceso de fabricación frecuentemente utiliza tecnologías avanzadas para supervisar y controlar la productividad y la calidad, dos características fundamentales, especialmente en un mundo como el de la fabricación, en el que tanto directores como operarios tratan continuamente de mejorar el rendimiento de los procesos.

Es preciso controlar muchos parámetros diferentes para conseguir un proceso eficiente del que resulte un producto de excepcional calidad. Por consiguiente se necesitan modernos planteamientos y herramientas como Six Sigma, Design of Experiments (DOE) y SPC.

La herramienta Six Sigma disfruta de una excelente reputación. Se trata de un enfoque y una metodología para eliminar defectos en cualquier proceso, de forma disciplinada, a partir de los datos precedentes. Para alcanzar el nivel Six Sigma, en un proceso no se han de producir más de 3,4 defectos por cada millón de oportunidades.

Para entender perfectamente los procesos y conseguir mejoras continuas, la implantación de Six Sigma requiere reunir, visualizar y analizar los datos de los mismos.

La representación estadística de Six Sigma describe cuantitativamente la ejecución de un proceso. Las herramientas estadísticas y de resolución de problemas son similares a las de otras modernas estrategias de mejora de la calidad. Sin embargo, Six Sig-

ma hace hincapié en la aplicación metódica y sistemática de estas herramientas, que conduce a importantes mejoras y avances con efectos espectaculares y medibles en términos de resultados.

La estrategia de Six Sigma, basada en mediciones, se centra en la mejora de procesos aplicando proyectos de mejora. Esto se lleva a cabo siguiendo una hoja de ruta básica Six Sigma, el proceso DMAIC. DMAIC, cuyo nombre corresponde a las iniciales inglesas de las fases Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar, es un sistema que pretende conseguir mejoras graduales en los procesos ya existentes que no cumplen los requisitos y requieren ser mejorados.

Para alcanzar los objetivos antes mencionado, Six Sigma utiliza diferentes herramientas estadísticas. Sin embargo, la técnica SPC –y sus gráficos asociados de control **1**– es la principal herramienta necesaria para lograr reducir la variación en los procesos. SPC es una metodología empleada para representar gráficamente un proceso y decidir rápidamente si está "fuera de control" (por ejemplo, cuando existe una variación por causas especiales). Se investiga entonces el proceso utilizando una o varias de las herramientas de mejora de procesos (Pareto, DOE, diagrama de causas y efectos (C&E), análisis de fallos y efectos (FMEA) para determinar la causa original del estado de "fuera de control". Una vez determinada la causa original, se establece una estrategia

para corregirla. La efectividad de cualquier cambio se puede verificar usando SPC **2**.

La variación se puede dividir en dos componentes: la variación natural del proceso, llamada frecuentemente causa común o variación del sistema (la fluctuación o variación inherente que ocurre de forma natural en todos los procesos) y la variación debida a una causa especial (generalmente un problema particular o un suceso extraordinario en el sistema/proceso).

La metodología Six Sigma se sigue muy a menudo en procesos de fabricación discreta y continua. ABB ha experimentado las grandes ventajas de Six Sigma y SPC para mejorar la calidad y aumentar los beneficios. El centro de investigaciones de nuestra compañía ha desarrollado un sistema SPC dedicado a supervisar y analizar procesos de fabricación discreta. Se ha modernizado una técnica ya probada, fácil de instalar y efectiva para tomar decisiones. Esta técnica está siendo desplegada actualmente junto con el sistema MES (Manufacturing Execution System) de ejecución de la fabricación de ABB, y se ha visto fortalecida por el reciente lanzamiento de una iniciativa específica perteneciente al Programa de Excelencia Operacional del Grupo, que promueve el uso de sistemas SPC en procesos de fabricación discreta.

Un sistema de producción, como la mayoría de los sistemas de la vida real, consta de sucesos dependientes y variables. Puesto que las cosas no ocurren aisladamente necesitamos un enfoque a nivel de sistemas para decidir la mejor forma de mejorar el rendimiento. Éste es el mensaje más importante de algunos de los grandes pensadores del siglo XX como W. Edwards Deming, Jay Forrester, Peter Senge y Eli Goldratt.

Un buen ejemplo de sistema con sucesos variables y dependientes es una autopista en hora punta. Cada automóvil que circula es un suceso que depende del movimiento de los demás automóviles. Algunas variables en este caso son los distintos tiempos de reacción,

la habilidad de los conductores, el funcionamiento de cada coche y las condiciones de los neumáticos y del tiempo. Un aumento del número de vehículos creará en algún lugar congestiones que afectarán al flujo. Además aparece el “efecto goma elástica”, muy visible a lo largo de las colas congestionadas. Los conductores se ven obligados a ajustar constantemente su comportamiento para responder al movimiento errático del tráfico.

Los mismos efectos pueden verse en las líneas de producción. Cuando en el taller se hacen demasiados trabajos el flujo se interrumpe y el resultado final es una pobre productividad general. En esta situación, el planteamiento reduccionista choca contra el enfoque orientado al sistema. Cuando se intenta conseguir altos rendimientos locales en cada uno de los subprocessos, la cantidad de trabajos que se han de realizar en el taller es mayor que la cifra óptima para que el flujo sea rápido. El resultado será un exceso de trabajos en curso (WIP), largos tiempos de ejecución y costes mayores, además de la menor eficiencia general. Esto también muestra claramente cómo el uso de la intuición, con las mejores intenciones

pero sin un profundo conocimiento de las cuestiones fundamentales de la fabricación, pueden terminar por provocar problemas.

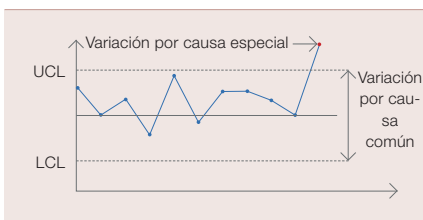
El “efecto goma elástica” es mayor en las largas cadenas de suministro, donde se le conoce como “efecto látigo”. La mayor demora en la transferencia de información y materiales causa fluctuaciones de las existencias y de la disponibilidad. La clave para dirigir la producción parece residir en comprender la variación y sus efectos sobre el sistema de producción y de suministros en conjunto.

Gestión de las variaciones, el punto de vista del flujo

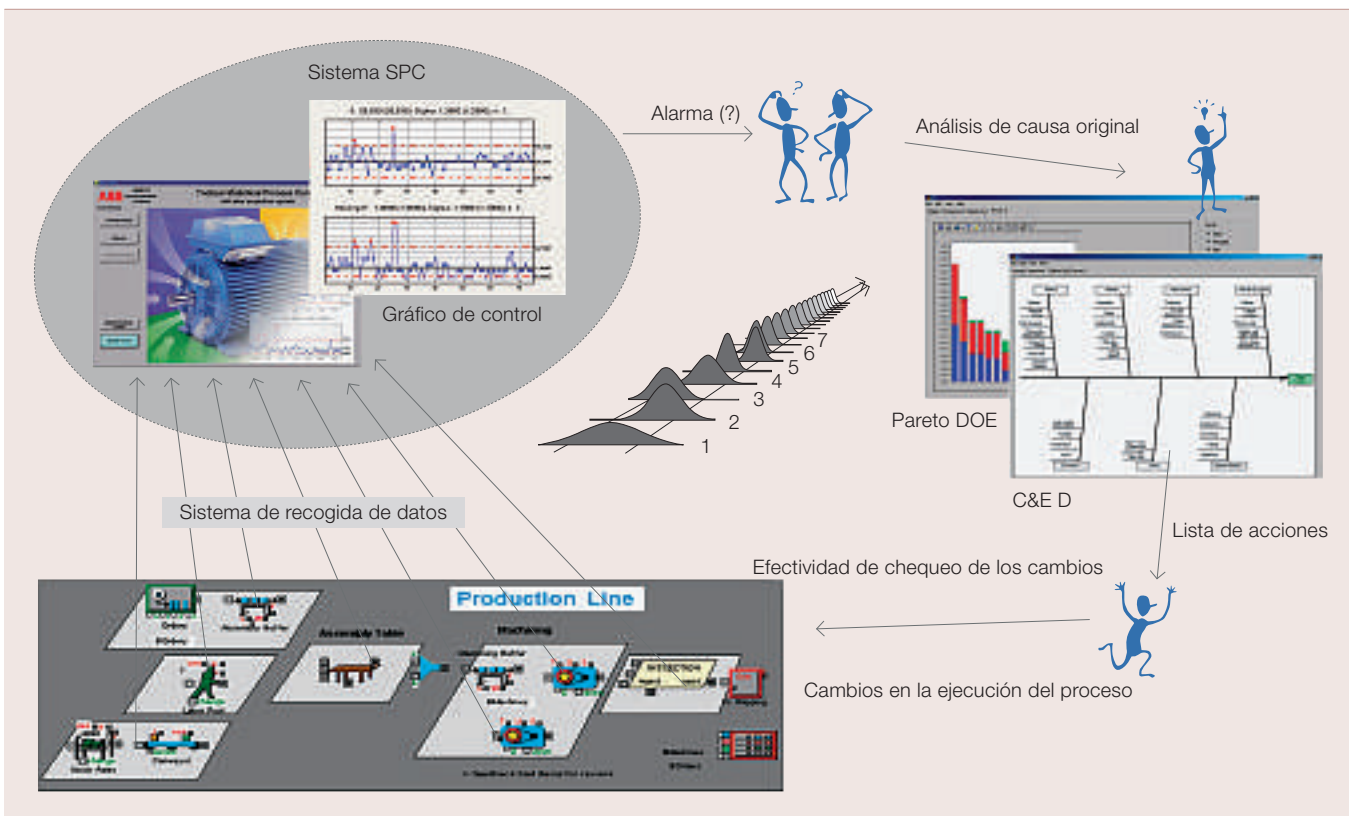
Una de las leyes fundamentales de la fabricación establece que “siempre que aumenta la variabilidad de un sistema de producción disminuye el rendimiento del mismo”. Esto implica que reduciendo la variabilidad es más fácil gestionar y mejorar los procesos de fabricación. Henry Ford y el famoso sistema de producción de Toyota pensaron sin duda de este modo.

Pero, al parecer, no consideraron que los sistemas con alto grado de variación tienen, sin duda, potencial de

1 Diagrama de control: causas de variación comunes y especiales



2 Reducción constante de la variación: mapa básico SPC



Tendencias de la fabricación

mejora si se encuentran formas inteligentes de gestionar tal variación.

Gestión de las variaciones, conceptos

Hacia finales del siglo XX, la industria comenzó a explotar el potencial de fabricar una variedad de productos a partir de un conjunto común de componentes estandarizados. En principio hay dos formas de enfocar este asunto: reducir la variación o gestionarla ³. ABB desarrolló el concepto CP3¹⁾ (Common Pull Production Practices) para abordar a la vez estos dos aspectos. CP3 se centra en el control de la producción, en la circulación de materiales y de información en una fábrica y en la forma en que se integran los procesos de los proveedores en la fábrica. Estas prácticas se basan en el concepto de fabricación ajustada y en la teoría TOC²⁾ (Theory of Constraints) de limitaciones.

En la producción Pull (por tirón de la demanda), los pedidos de los clientes ponen en marcha la producción, a diferencia de un sistema que produce componentes o piezas de acuerdo con un programa predeterminado. El sistema Pull hace más coherente el proceso de fabricación.

El concepto CP3 tiene un papel fundamental en la introducción de la producción Pull con control WIP, que se basa en otro aspecto fundamental de la fabricación, la "Ley de Little"

Cuadro informativo 2 :

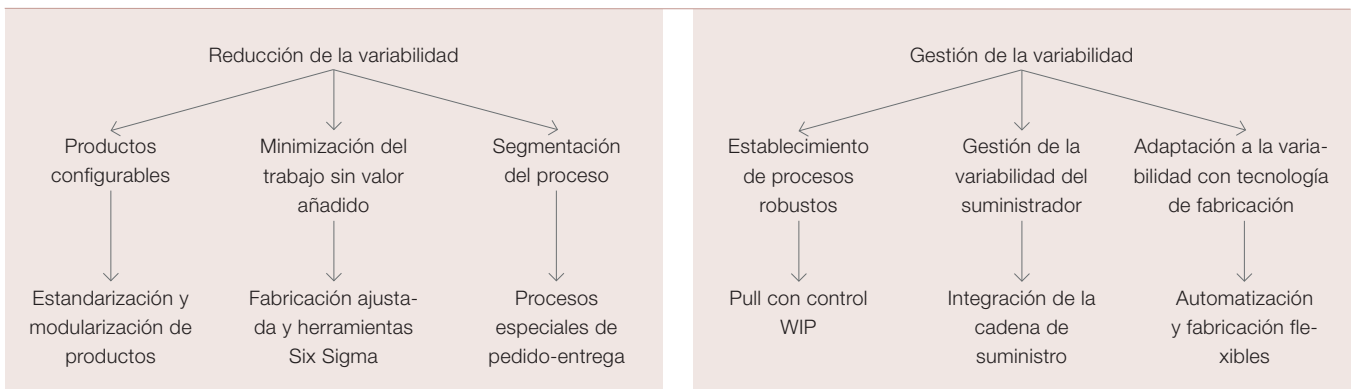
$$WIP^{1)} = \text{Ritmo de producción (PR)}^{1)} \times \text{Tiempo de ejecución (TPT)}^{1)}$$

Existen muchas otras leyes o relaciones que rigen las operaciones de fabricación, muchas de las cuales **Tabla 1** ²⁾ están relacionadas con las ya mencionadas. Para gestionar eficientemente la fabricación es imprescindible comprender las leyes físicas de la misma.

A principios del siglo XX, los motores eléctricos empezaron a sustituir a las máquinas de vapor como fuente principal de energía para la maquinaria. Los motores BBC de CA para corriente de una, dos o tres fases tuvieron gran importancia en este desarrollo.



³ Conjunto de opciones para reducir o gestionar la variación



Cuadro informativo 2 Ley de Little

La Ley de Little establece que para cualquier ritmo dado de producción el tiempo medio de ejecución de la producción es directamente proporcional al valor WIP. Este enunciado tiene varias ramificaciones importantes:

- En primer lugar, si aumenta el tiempo de ciclo se necesitará un valor WIP mayor para conseguir la misma producción de salida. Es evidente que los tiempos en cola de espera, añadidos a los sistemas ERP (Enterprise Resource Planning) de planificación de recursos empresariales, para compensar las variaciones diarias de la duración de las diversas actividades, son una de las causas originales de que el valor WIP sea excesivamente alto en muchas fábricas.
- En segundo lugar, esto indica que la velocidad de producción se puede alcanzar limitando el número de trabajos que llegan al taller. Simplemente "limitando" el valor WIP es posible aumentar significativamente la velocidad del flujo.

La ley de Little puede considerarse como la "ley de Ohm" de la fabricación:

- Si $R = \frac{V}{I}$, entonces $TPT = \frac{WIP}{PR}$ donde:
- **resistencia** necesaria para que un producto pase por todo el proceso de fabricación.
- WIP representa el **potencial** de producción en el sistema que espera a ser completado.
- PR representa la **velocidad del flujo –intensidad–** de producción.

Notas

¹⁾ Véase Glosario en la página 74. En la página 25 puede leer usted una explicación sobre TOC.

²⁾ Adaptado de "Factory Physics", Hopp y Spearman, 2000, 2nd edición.

Comprensión del entorno de fabricación

Es importante conocer cada entorno

concreto de fabricación. La variación y la naturaleza de la interacción entre actividades son distintas dependiendo

del entorno. Examinemos en primer lugar la estructura del proceso en la figura 4:

Los entornos situados en la parte superior izquierda de la figura tienen un grado de variación mucho más alto que los de la parte inferior derecha. El diagrama muestra también que los “nuevos” productos, fabricados inicialmente en pequeñas cantidades, tienden a situarse en la parte superior izquierda. Después del lanzamiento con éxito de los productos, ya eliminados los defectos sistemáticos iniciales de la producción, los productos tienen potencial para desplazarse hacia la esquina inferior derecha.

Esta imagen sólo presenta un punto de vista. Hay otras formas de ver las cosas. La lección principal, no obstante, es que cada entorno de fabricación es único. El primer paso es comprender la física fundamental del proceso concreto de fabricación y especialmente la forma en que los componentes funcionan conjuntamente como un sistema, prestando especial atención a la naturaleza de la variación dentro del mismo. Sin esa comprensión, cualquier acción intuitiva podría incluso empeorar el rendimiento del sistema.

Si se afrontan los retos de la variación con las herramientas adecuadas, el rendimiento de un proceso puede aumentar considerablemente. Utilizando CP3 se pueden conseguir excelentes resultados en seis meses. Dominando la física fundamental de la fabricación y profundizando la comprensión de la misma para cubrir la colaboración entre empresas, se puede conseguir mucho más. Pero ésa es ya otra historia.

Fredrik Nordström
ABB Oy, ABB Corporate Research
Vaasa, Finlandia
fredrik.nordstrom@fi.abb.com

Piotr Gawad
ABB Sp. z o.o.
ABB Corporate Research
Cracovia, Polonia
piotr.gawad@pl.abb.com

Adam Nowarski
ABB (China) Limited
ABB Corporate Research
Beijing, China
adam.nowarski@cn.abb.com

Table 1 Conjunto de leyes físicas de la fabricación e interrelaciones fundamentales

<p>Ley (Variabilidad): Un aumento de la variabilidad siempre degrada el rendimiento de un sistema de producción.</p>	<p>variabilidad requerida por un sistema de producción.</p>
<p>Corolario (Ubicación de la variabilidad): En una línea donde las descargas de trabajo son independientes de las finalizaciones, la variabilidad al principio de una cadena aumenta más el tiempo de ciclo que una variabilidad equivalente a lo largo de la cadena.</p>	<p>Ley (Capacidad): En régimen constante, todas las plantas producirán a una velocidad media inferior a la capacidad media.</p>
<p>Ley (Amortiguación de la variabilidad): La variabilidad en un sistema de producción podrá ser amortiguada por alguna combinación de los elementos siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Inventario ■ Capacidad ■ Tiempo 	<p>Ley (Utilización): Si una estación aumenta la utilización sin efectuar ningún otro cambio, el valor medio de WIP y el tiempo de ejecución aumentarán de forma fuertemente no lineal.</p>
<p>Corolario (Flexibilidad de amortiguación): La flexibilidad reduce la amortiguación de la</p>	<p>Ley (Operaciones de montaje): El rendimiento de una estación de montaje decrece al aumentar cualquiera de los factores siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Número de componentes montados ■ Variabilidad de las llegadas de componentes ■ Falta de coordinación entre llegadas de componentes

4 Matriz de procesos para producto (Fuente: J Miltenburg, 1995: 'How to formulate and implement a winning plan')

