

**Recepción:** 07 de diciembre de 2014

**Aceptación:** 22 de diciembre de 2014

**Publicación:** 29 de diciembre de 2014

# LOS SISTEMAS DE FABRICACIÓN FLEXIBLE COMO SOLUCIÓN A LA DEMANDA DE LOS MERCADOS ACTUALES

## FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEMS AS A SOLUTION FOR THE CURRENT MARKET DEMAND

Ana Mari Berná Vidal <sup>1</sup>

Eduardo Úbeda Mestre <sup>2</sup>

Alfredo G. Vidal Sánchez <sup>3</sup>

David Juárez Varón <sup>4</sup>

1. Máster Universitario en Ingeniería de Organización y Logística. Ingeniera Técnica en Diseño Industrial. Universidad Politécnica de Valencia. E-mail: [anbervi4@epsa.upv.es](mailto:anbervi4@epsa.upv.es)
2. Máster Universitario en Ingeniería de Organización y Logística. Ingeniera Técnica en Diseño Industrial. Universidad Politécnica de Valencia. E-mail: [edubmes@epsa.upv.es](mailto:edubmes@epsa.upv.es)
3. Máster Universitario en Ingeniería de Organización y Logística. Ingeniero Técnico en Diseño Industrial. Universidad Politécnica de Valencia. E-mail: [alvisan@etsii.upv.es](mailto:alvisan@etsii.upv.es)
4. Ingeniero en Organización Industrial. Doctor en Ingeniería (programa del dpto. de Ingeniería Mecánica y Materiales). Universidad Politécnica de Valencia. E-mail: [djuarez@mcm.upv.es](mailto:djuarez@mcm.upv.es)

## RESUMEN

Los Sistemas de Fabricación Flexible permiten cubrir la necesidad actual de poder ser flexibles y versátiles en cuando a la variación en la demanda como en los mercados, existiendo una competitividad que obliga al fabricante a tener una mayor variedad de productos.

En la actualidad, esta tecnología está avanzando en diferentes ramas, pero principalmente se están estudiando diferentes algoritmos de control y modelado de SFF con el objetivo de ser más eficientes que los modelos tradicionales. Para modelar, la herramienta matemática más empleada son las Redes de Petri y algunos algoritmos basados en Sistemas de Inteligencia de Enjambres.

Además del modelado, existen otras ramas de investigación como la repercusión que tienen los retrasos de la información a los SFF, la flexibilidad, el consumo energético, integración de nuevos equipos a los SFF.

## ABSTRACT

Flexible Manufacturing Systems (FMS) allow getting the present need to be flexible and versatile in order to meet the variation in demand and in markets, existing a competitiveness which forces the manufacturer to have a greater variety of products.

Currently, this technology is advancing at different branches, but mostly they are studying different control and SFF modeling algorithms in order to be more efficient than traditional models. For modeling, the most used mathematical tools are Petri nets and some algorithms based on Swarm Intelligence Systems.

Besides modeling, there are other areas of research such as the impact of delayed information to SFF, flexibility, power consumption and the integration of new equipment into the SFF.

## PALABRAS CLAVE

Sistema, fabricación, flexible, SFF, Petri.

## KEY WORDS

System, flexible, manufacturing, FMS, Petri.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años, los continuos cambios en los mercados con las características de una disminución de la tasa de crecimiento, con la diversificación de productos y la necesidad de querer adaptarse a las especificaciones de los cliente, además de la búsqueda de una mayor competitividad, acompañado con ciclos de vida muy cortos de los productos, han estado obligando a las empresas a ser mucho más flexibles y versátiles.

Las empresas convencionales que diseñaban su producción en grandes series o lotes, se encuentran con exceso de capacidad productiva respecto a la demanda, con lo que generan inventarios innecesarios, además de no tener la posibilidad de atender las diferentes demandas en cuando a variación de los productos.

Este problema ha generado la necesidad de realizar un cambio hacia los sistemas de fabricación flexible (SFF)

Con este cambio, las empresas intentan conseguir la rentabilidad en las actuales condiciones del mercado, las políticas de producción se orientan según los siguientes criterios:

- Flexibilidad del producto y de los procesos de producción.
- Calidad y fiabilidad del producto.
- Reducción de tiempos de respuesta en el lanzamiento de nuevos productos.
- Eliminación del gasto no estrictamente necesario.
- Reducción de los tiempos de preparación y de espera.
- Automatización de los procesos.
- Aumento de la productividad.

En el mercado de productos existe una fuerte competitividad que obliga al fabricante a atraer a sus clientes ofreciendo una mayor gama de productos (productos especiales para cada cliente), menores plazos de entrega y mejores precios.

Desde el punto de vista de la fabricación, esta situación plantea las siguientes exigencias:

- Alta productividad incluso para pequeños lotes de fabricación.
- Reducción de los tiempos de recorrido.
- Reducción de existencias.
- Reducción de costes de personal.
- Mayor competitividad.
- Mayor calidad.
- Menores costes.
- Aumento de la variedad de piezas a fabricar.
- Reducción del tamaño de los lotes.
- Reducción de los tiempos de reacción.
- Reducción de los tiempos de recorrido.
- Reducción de existencias.
- Aprovechamiento de las máquinas y medios de servicio

## DESARROLLO

### DEFINICIÓN

Se entiende por sistemas de fabricación flexible (SFF) a un conjunto o grupo de máquinas herramientas de control numérico enlazadas entre sí mediante un sistema de transporte de piezas común y un sistema de control centralizado.

Para cada pieza a fabricar, se dispone de programas de piezas comprobados y memorizados en una estación de datos central. Varias máquinas-herramientas diferentes (complementarias entre sí) o similares (redundantes) realizan los mecanizados necesarios en las piezas de una familia, de manera que el proceso de fabricación tiene lugar de modo automático.

Los sistemas de fabricación flexible son, por tanto, una combinación de componentes ya existentes:

- Máquinas-herramientas
- Sistema de transporte de piezas
- Dispositivo de cambio de piezas
- Un sistema de control central

La Fabricación Flexible permite que la producción de una serie limitada de piezas obtenga las ventajas reservadas a la fabricación de grandes series (Economía de Escala).



**Gráfico 1.** Grupos de fabricación Flexibles de carácter docente. En la imagen de arriba, la ubicada en el Laboratorio de Ingeniería de Procesos de Fabricación de la Escuela Politécnica Superior de Alcoy.

**Fuente:** Elaboración propia.

## APLICACIONES

### SISTEMAS DE INFORMACIÓN

Los SFF se supone que funcionan en un modo "período de revisión"; es decir, se toman las decisiones de control (por ejemplo, la secuenciación y la expedición), basado en la información monitorizada a intervalos de tiempo (elementos discretos) prede-terminados llamados "períodos de revisión".

El deterioro del rendimiento del SFF se produce debido a la obsolescencia de la información del estado del sistema.

Según Capriham [1] es conveniente examinar la magnitud de los efectos adversos que tienen los retrasos de información sobre los rendimientos de un sistema de fabricación flexible (SFF).

Para ello, han realizado los siguientes experimentos de simulación basados en:

- Los retrasos de la información degradan significativamente el rendimiento de los SFF para medidas basadas en la fecha de vencimiento (tardanza y porcentaje medio de trabajos retrasados).
- Los retrasos de información degradan el rendimiento de los SFF si nos basamos en el tiempo de flujo y la utilización media de la máquina.
- La flexibilidad de enrutamiento, a menudo considerado un factor importante en el rendimiento de los SFF es sustituida por la revisión del estado de la información retrasada.

Los autores llegan a la conclusión que después de realizar las diferentes simulaciones de sus experimentos, el retraso en cierto tipo de información sí que deterioran el rendimiento global del SFF.

### FLEXIBILIDAD

Por otra parte, la flexibilidad y agilidad procesada por un SFF hacen que sea completamente diferente a la de los sistemas de fabricación tradicionales. Un SFF puede por tanto reaccionar rápidamente a los cambios rápidos de las necesidades de producción, ya sea planeado o no, para satisfacer los diferentes segmentos de mercado con productos a precios razonables y personalizados. Como un componente indispensable de la fabricación integrada por ordenador, un SFF por lo general consiste en tomar y colocar los robots, centros de mecanizado con múltiples capacidades y funciones, sistemas logísticos y sistemas de control avanzados, es por ello que Liu [2] plantea una nueva estrategia para la fabricación, llamada "personalización" que se convierte en una tendencia popular y ha sido adoptada ampliamente por un creciente número de empresas, especialmente las que fabrican productos de alto valor añadido y tecnología. Los sistemas de fabricación flexible se construyen para realizar una producción rápida y mixta.

## ENERGÍA

---

Ante la problemática energética y la producción en sistemas de fabricación altamente automatizada Choi [3] se centra en un problema de planificación de producción de un sistema de fabricación altamente automatizada considerando múltiples planes de proceso con diferentes necesidades energéticas.

El sistema consta de varios subsistemas estrechamente interconectados tales como el sistema de procesamiento, el de material, el sistema de manipulación, el sistema de transporte de la herramienta y el sistema auxiliar responsable de un suministro de refrigeración/lubricantes y una eliminación de residuos.

En este artículo, se propone una metodología para la estimación de los flujos de consumo de energía y materiales. Además, este estudio se centra en un problema de planificación de la producción con el objetivo de minimizar la suma ponderada del consumo de energía, el costo del inventario de almacenamiento y el costo de un pedido realizado considerando múltiples planes de proceso.

## INTEGRACIÓN

---

Sanz [4] presenta una metodología para la inclusión de una estación de medición automática en un sistema de fabricación flexible mediante el tratamiento de la estación de medición como una estación de trabajo integrada en el SFF.

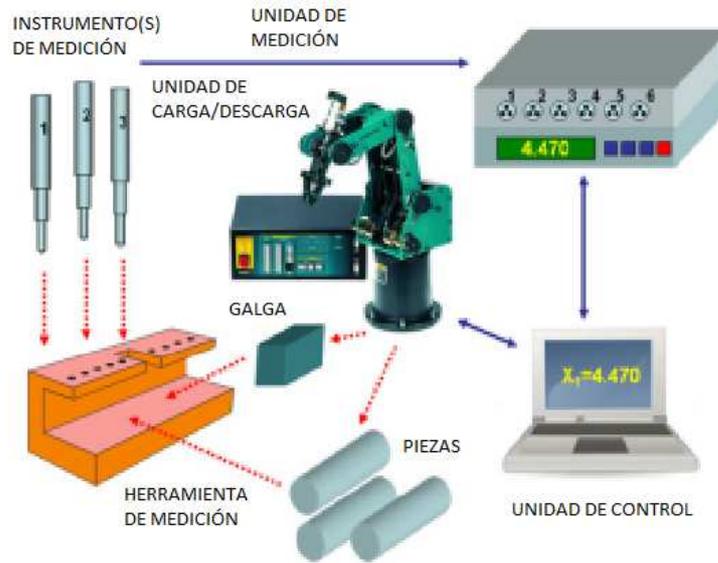
Este enfoque provoca una distorsión mínima de las funciones de trabajo del SFF y no depende de los algoritmos de control implementados en el sistema.

Se presenta un estudio de caso sobre la base de un SFF ubicados en el Centro Aeronáutico.

Este sistema contiene los principales elementos que se necesitan en un SFF:

- Dos máquinas herramientas informatizadas de control numérico para el mecanizado
- Dos robots industriales para el manejo y la manipulación.
- La estación de medición en el caso de estudio se lleva a cabo con uno de los robots que se utilizan para llevar a cabo las acciones necesarias de medición y manipulación.

Los autores proponen una metodología viable basada en el establecimiento de una analogía con las acciones realizadas por las diferentes estaciones integradas en un SFF, principalmente entre las estaciones de trabajo y las estaciones de medición.



**Gráfico 2.** Esquema de la estación de medición automática integrada en el sistema de fabricación flexible. **Fuente:** Elaboración propia.

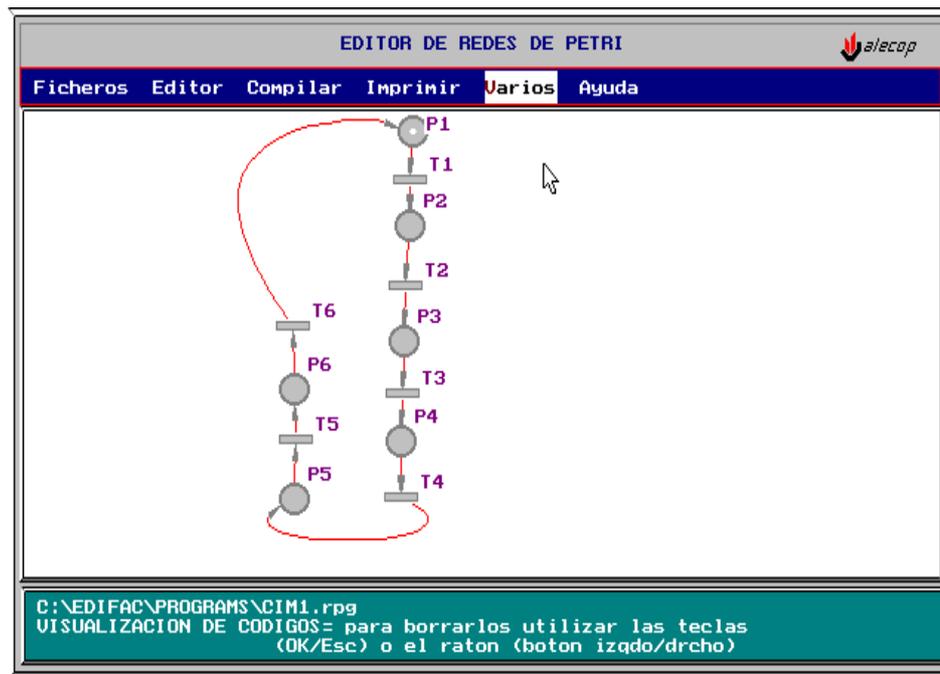
Los autores llegan a la conclusión de que la incorporación de una estación de medición automática en un SFF depende en gran parte de la configuración del sistema anterior aunque esta tarea puede llevarse a cabo sin modificaciones sustanciales en el sistema o la lógica de control.

## ALGORITMOS DE MEJORAS.

### REDES PETRI

Una Red de Petri es una representación matemática o gráfica de un sistema a eventos discretos en el cual se puede describir la topología de un sistema distribuido, paralelo o concurrente.

La red de Petri es una generalización de la teoría de autómatas que permite expresar un sistema a eventos concurrentes.



**Gráfico 2.** Ejemplo de Redes de Petri sencillas. Fuente: Elaboración propia.

Una red de Petri está formada por lugares, transiciones, arcos dirigidos y marcas o fichas que ocupan posiciones dentro de los lugares. Las reglas son:

- Los arcos conectan un lugar a una transición así como una transición a un lugar.
- No puede haber arcos entre lugares ni entre transiciones.
- Los lugares contienen un número finito o infinito contable de marcas.
- Las transiciones se disparan, es decir consumen marcas de una posición de inicio y producen marcas en una posición de llegada.
- Una transición está habilitada si tiene marcas en todas sus posiciones de entrada.

En su forma más básica, las marcas que circulan en una red de Petri son todas idénticas. Se puede definir una variante de las redes de Petri en las cuales las marcas pueden tener un color (una información que las distingue), un tiempo de activación y una jerarquía en la red.

La mayoría de los problemas sobre redes de Petri son el carácter acotado y la cobertura.

Las redes de Petri están reconocidas como una de las herramientas más potentes para el modelado de los sistemas de fabricación flexible.

Pan [5] llega a la conclusión de que esta nueva forma de cálculo es más eficiente que los métodos tradicionales y también que se pueden conseguir mejores resultados con los modelos de la red de Petri y por lo tanto se pueden implementar en los sistemas de fabricación flexible.

En general, existen tres estrategias principales de métodos de resolución de estancamiento que utilizan técnicas de red de Petri en SFF, que son

- La detección de estancamiento y recuperación,
- Prevención de interbloqueo.
- Prevención punto muerto.

Es bien sabido que la prevención de interbloqueo se considera que es uno de los métodos más eficaces en SFF.

Según Hou [6] las redes de Petri son cada vez más un formalismo y ampliamente utilizados en el tratamiento de los problemas de estancamiento en los SFF de manera que los puntos muertos nunca puedan ocurrir.

La prevención de punto muerto basado en el control de sifón es una aplicación típica de técnicas de análisis estructurales de las redes de Petri. En la aplicación de sifones se ha encontrado su alta complejidad estructural ya que el número de sifones en un modelo de red de Petri que crece exponencialmente con respecto a su tamaño.

También en este campo donde un SFF con una alta automatización donde su configuración controlada tiende a provocar bloqueos (situación altamente indeseable), Li [7] presenta un modelo de prevención de punto muerto para las redes de Petri a través de la combinación de la programación entera mixta y el concepto de sifones.

En esta rama, existen varios estudios como el de Yen-Liang Pan [5] que también estudian la problemática de los puntos muertos en la asignación de recursos a los SFF, utilizando la teoría de las regiones y el método basado en el sifón para estudiar las políticas de prevención del punto muerto.

La teoría de las regiones puede obtener un controlador máximo permisivo mientras que el método del sifón permite utilizar un menor número de lugares de control y reducir el coste computacional.

Otro tema a tratar en las redes de Petri son el modelado de la matriz de tiempos en SSF que propone Huang [8], donde utilizan la teoría de las redes de Petri y la ingeniería industrial estándar para modelar dicha matriz de tiempos.

Modelan los tiempos de operación y los introducen en la matriz para activar su funcionamiento. Éstas matrices de tiempos son factores clave para la integración de los sistemas de fabricación de acercarse al mundo de la fabricación en tiempo real.

El procedimiento clave para el desarrollo de estas matrices de tiempos es desarrollar e integrar la estructura de la matriz de fabricación con las técnicas de max/plus álgebra.

El resultado de este estudio es dar a conocer y establecer el tiempo en el sistema de fabricación de la matriz para acercarse a la verdadera situación de la producción mundial.

Por último en relación con las redes de Petri y en cuanto a la estrategia de búsqueda para la programación de sistemas de fabricación flexibles utilizando simultáneamente funciones heurísticas admisibles y no admisibles, Huang [9] proponen y evalúan, para la programación de sistema de fabricación flexible (SFF), de manera eficiente, una estrategia de búsqueda mejorada y su aplicación a la programación SFF en el marco de redes de Petri temporizadas.

En la ejecución de una red de Petri, el método propuesto puede utilizar simultáneamente las funciones heurísticas admisibles y no admisibles.

Una heurística admisible es usada para estimar el costo de alcanzar el estado objetivo en un algoritmo de búsqueda informada. Una heurística será admisible para cierto problema de búsqueda cuando el costo estimado sea siempre menor o igual que el costo mínimo de alcanzar el estado objetivo.

### BUSQUEDA DE CUCKOO

La Búsqueda de Cuckoo (pertenece a los Sistemas de Inteligencia de Enjambres) imita el comportamiento inquietante de algunas especies de aves que utilizan de acogida para poner sus huevos y criar a sus polluelos.

Este algoritmo de búsqueda se ha mejorado con los vuelos de Lévy con pasos de salto extraídas de dicha distribución. Los estudios recientes sugieren que la Búsqueda de Cuckoo puede superar a otros algoritmos como la optimización de enjambre de partículas, proporcionando incluso resultados más sólidos

Burnwal [10] emplea para la optimización de la programación, el enfoque basado en las Búsquedas de Cuckoo, con el objetivo de reducir al mínimo los costes por demora en la fabricación y la maximización del tiempo de utilización de la máquina optimizando la planificación de un SFF.

Los resultados obtenidos con este estudio superan los resultados de los algoritmos heurísticos existentes.

## CONCLUSIONES

La fuerte competitividad en el mercado actual así como la necesidad de ser flexibles, ha obligado a las empresas a realizar un cambio hacia los SFF.

Este cambio ha conseguido que exista una mentalidad de mejora continua, llevando a diferentes investigadores a realizar diferentes estudios en la temática de los SFF.

Los principales estudios que se han encontrado y que mayor importancia tienen en la actualidad, son los basados en el control y modelado de los SFF de la manera más efectiva y con el menor tiempo de computación posible. Para ello, los algoritmos empleados sobretodo, son aquellos que se basan en las Redes de Petri y las estrategias de resolución de los puntos muerto.

Además de las Redes de Petri, para el modelado y control, existen otras técnicas que se están estudiando y que se basan en los Sistemas de Inteligencia de Enjambres, conceptos en los que se basan la Inteligencia Artificial, como por ejemplo la Búsqueda de Cuckoo.

Además del modelado, existen otras ramas de investigación como la repercusión que tienen los retrasos de la información a los SFF, la flexibilidad, el consumo energético, integración de nuevos equipos a los SFF, etc.

## REFERENCIAS

1. Caprihan, R., A. Kumar, and K.E. Stecke, *Evaluation of the impact of information delays on flexible manufacturing systems performance in dynamic scheduling environments*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013. **67**(1-4): p. 311-338.
2. Liu, D., Z. Li, and M. Zhou, *A parameterized liveness and ratio-enforcing supervisor for a class of generalized Petri nets*. Automatica, 2013. **49**(11): p. 3167-3179.
3. Choi, Y.-C. and P. Xirouchakis, *A production planning in highly automated manufacturing system considering multiple process plans with different energy requirements*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014. **70**(5-8): p. 853-867.
4. Sanz, A., et al., *A methodology for the implementation of automated measuring stations in flexible manufacturing systems*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013. **66**(5-8): p. 1065-1073.
5. Pan, Y.-L., et al., *Enhancement of an efficient control policy for FMSs using the theory of regions and selective siphon method*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013. **66**(9-12): p. 1805-1815.
6. Hou, Y., et al., *Extraction of elementary siphons in a class of generalized Petri nets using graph theory*. Engineering Computations, 2014. **31**(2): p. 331-352.
7. Li, S.Y., et al., *Design of liveness-enforcing supervisors with simpler structures for deadlock-free operations in flexible manufacturing systems using necessary siphons*. Journal of Intelligent Manufacturing, 2013. **24**(6): p. 1157-1173.
8. Huang, H.-H., et al., *Time matrix controller design of flexible manufacturing systems*. Computers & Industrial Engineering, 2013. **65**(1): p. 28-38.
9. Huang, B., R. Jiang, and G. Zhang, *Search strategy for scheduling flexible manufacturing systems simultaneously using admissible heuristic functions and nonadmissible heuristic functions*. Computers & Industrial Engineering, 2014. **71**: p. 21-26.
10. Burnwal, S. and S. Deb, *Scheduling optimization of flexible manufacturing system using cuckoo search-based approach*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013. **64**(5-8): p. 951-959.