

## **SISTEMAS DE MANUFACTURA FLEXIBLE UN ENFOQUE ESTRUCTURAL**

PAGINAS de la U. C.P. R... entregan a los participantes del Congreso de SOCIA, el texto de la Conferencia del Profesor César Jaramillo, Director del Departamento de Informática U.C.P.R.

Durante este congreso de SOCIA, que se cumple en la ciudad de Manizales, se transmiten ideas, se dan luces, se hacen análisis sobre la problemática él industrial colombiana.

La mutación desde nuestra condición netamente agrícola a la tan deseada condición de país industrializado, no ha encontrado un avance estable. Un año damos un paso adelante, y otro no damos ningún paso, y a lo mejor otro año el paso es hacia atrás.

"Hablemos de Industria", ha acogido la ponencia presentada por César Jaramillo y la pone a consideración de los miembros de SOCIA.

PAGINAS. ..de la U.C.P.R., ha acogido el texto que se encuentra a continuación.

No solamente las fábricas se robotizan, sino que el cambio tiene que ser más gigantesco y los Sistemas de Manufactura Flexible o FMS serán pronto un tema muy popular.

El contenido de éste número de PARGINAS...de la U.C.P.R. incluye definiciones, clasificaciones y optimizaciones de los FMS.

Está dirigido a los legos en el tema, y es un perfecto complemento al capítulo de la Robótica.

Esta es otra semilla en la labor sembradora de PÁGINAS ..., que aumentará las cosechas científicas y culturales en nuestro medio.

Esperamos lector, que usted sea terreno abonado para esa siembra, y que usted sea contribución grande en la cosecha.

César Jaramillo N.

Director Dpto. de informática U.C.P.R. Profesor U.C.P.R.

**CESAR JARAMILLO N. UNIDAD No. 414**

**CURSO DESESCOLARIZADO 861001**

# **SISTEMAS DE MANUFACTURA FLEXIBLE:**

## **UN ENFOQUE ESTRUCTURAL**

**OBJETIVO.** Esta unidad persigue dar unas ideas fundamentales al lector sobre los

sistemas de manufactura flexible (FMS).

**RESUMEN.** En los últimos cinco años los países desarrollados han presenciado un avance más rápido en la aplicación de alta tecnología de manufactura, que en los 10 años anteriores.

Muchas de esas aplicaciones han ocurrido bajo la insignia de un nuevo tipo de manufactura llamado Sistemas DE MANUFACTURA FLEXIBLE (FMS).

Con la implementación de los nuevos FMS está llegando un nuevo despertar de las oportunidades para la reducción de costos. En ésta unidad se presentan las estructuras y taxonomías del FMS..

Para explotar ésta estructura se presentan; los procesos del FMS: y los problemas, y discuten varios aspectos sobre la flexibilidad.

Para mostrar la complejidad de un FMS se definen los problemas de diseño y operacionales...

También se presentan las funciones básicas del robot y los sistemas de visión.

Y finalmente se subraya, los eventos de modularidad del FMS y las tendencias futuras de los desarrollos del FMS.

### **INTRODUCCION**

Existe un interés creciente en el desarrollo e implementación de los sistemas de manufactura flexible, (FMS).

Hoy por hoy se han implementado cientos de esos sistemas por todo el mundo; siendo el Japón el líder en términos de la cantidad de aplicaciones y de los éxitos administrativos y organizacionales asociados a éstas implementaciones.

Este interés creciente en los FMS ha traído muchos problemas nuevos.

Estos problemas y algunas de sus soluciones se han ilustrado en. muchas artes.,

y ya existe un periódico especializado en el tema y hoy muchos libros y trabajos al

respecto.

El objetivo de ésta unidad es discutir, caracterizar y unir muchos de esos eventos relativos a los FMS.

y otro objetivo puede ser definir problemas de los FMS que pueden servir como bases de posterior investigación o consideraciones prácticas.

### **TAXONOMIA ESTRUCTURAL DE LOS FMS**

En el sentido más amplio un FMS, puede estar formado de tres subsistemas. fabricación , maquinado y ensamble.

Cada uno de estos tres subsistemas puede estar altamente integrado con almacenamientos automatizados y con sistemas de diseño ayudados por computador. Ver figura 414 01.

La integración entre un FMS y un sistema de almacenamiento automatizado es muy frecuentemente un sistema de manejo de materiales, (por ejemplo. un sistema de vehículos guiados automáticamente, y un sistema de computador.

PAGINAS de la U. C.P. R... entregan a los participantes del Congreso de SOCIA, el texto de la Conferencia del Profesor César Jaramillo, Director del Departamento de Informática U.C.P.R.

Durante este congreso de SOCIA, que se cumple en la ciudad de Manizales, se transmiten ideas, se dan luces, se hacen análisis sobre la problemática él industrial colombiana.

La mutación desde nuestra condición netamente agrícola a la tan deseada condición de país industrializado, no ha encontrado un avance estable. Un año damos un paso adelante, y otro no damos ningún paso, y a lo mejor otro año el paso es hacia atrás.

"Hablemos de Industria", ha acogido la ponencia presentada por César Jaramillo y la pone a consideración de los miembros de SOCIA.

PAGINAS. ..de la U.C.P.R., ha acogido el texto que se encuentra a continuación.

No solamente las fábricas se robotizan, sino que el cambio tiene que ser más gigantesco y los Sistemas de Manufactura Flexible o FMS serán pronto un tema muy popular.

El contenido de éste número de PÁGINAS...de la U.C.P.R. incluye definiciones, clasificaciones y optimizaciones de los FMS.

Está dirigido a los legos en el tema, y es un perfecto complemento al capítulo de la Robótica.

Esta es otra semilla en la labor sembradora de PÁGINAS ..., que aumentará las cosechas científicas y culturales en nuestro medio.

Esperamos lector, que usted sea terreno abonado para esa siembra, y que usted sea contribución grande en la cosecha.

César Jaramillo N.

Director Dpto. de informática U.C.P.R. Profesor U.C.P.R.

**CESAR JARAMILLO N. UNIDAD No. 414**

**CURSO DESESCOLARIZADO 861001**

**SISTEMAS DE MANUFACTURA FLEXIBLE:**

**UN ENFOQUE ESTRUCTURAL**

**OBJETIVO.** Esta unidad persigue dar unas ideas fundamentales al lector sobre los sistemas de manufactura flexible (FMS).

**RESUMEN.** En los últimos cinco años los países desarrollados han presenciado un avance más rápido en la aplicación de alta tecnología de manufactura, que en los 10 años anteriores.

Muchas de esas aplicaciones han ocurrido bajo la insignia de un nuevo tipo de manufactura llamado Sistemas DE MANUFACTURA FLEXIBLE (FMS).

Con la implementación de los nuevos FMS está llegando un nuevo despertar de las oportunidades para la reducción de costos. En ésta unidad se presentan las estructuras y taxonomías del FMS..

Para explotar ésta estructura se presentan; los procesos del FMS: y los problemas, y discuten varios aspectos sobre la flexibilidad.

Para mostrar la complejidad de un FMS se definen los problemas de diseño y operacionales...

También se presentan las funciones básicas del robot y los sistemas de visión.

Y finalmente se subraya, los eventos de modularidad del FMS y las tendencias futuras de los desarrollos del FMS.

## **INTRODUCCION**

Existe un interés creciente en el desarrollo e implementación de los sistemas de manufactura flexible, (FMS).

Hoy por hoy se han implementado cientos de esos sistemas por todo el mundo; siendo el Japón el líder en términos de la cantidad de aplicaciones y de los éxitos administrativos y organizacionales asociados a éstas implementaciones.

Este interés creciente en los FMS ha traído muchos problemas nuevos.

Estos problemas y algunas de sus soluciones se han ilustrado en. muchas artes y ya existe un periódico especializado en el tema y hoy muchos libros y trabajos al respecto.

El objetivo de ésta unidad es discutir, caracterizar y unir muchos de esos eventos relativos a los FMS.

y otro objetivo puede ser definir problemas de los FMS que pueden servir como bases de posterior investigación o consideraciones prácticas.

## **TAXONOMIA ESTRUCTURAL DE LOS FMS**

En el sentido más amplio un FMS, puede estar formado de tres subsistemas. fabricación , maquinado y ensamble.

Cada uno de estos tres subsistemas puede estar altamente integrado con almacenamientos automatizados y con sistemas de diseño ayudados por computador. Ver figura 414 01.

La integración entre un FMS y un sistema de almacenamiento automatizado es muy frecuentemente un sistema de manejo de materiales, (por ejemplo. un sistema de vehículos guiados automáticamente, y un sistema de computador.

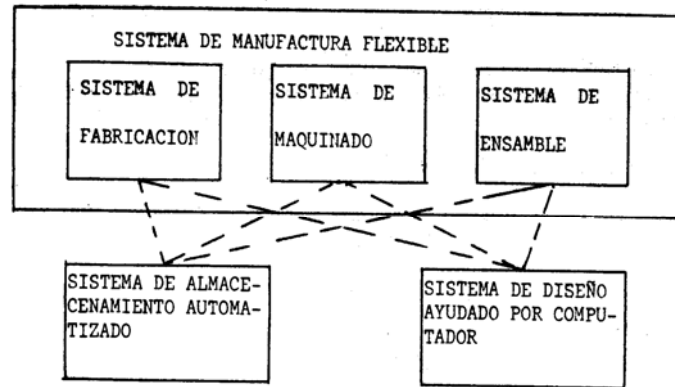


FIGURA 414 01 INTEGRACION DE LOS FMS CON LOS SISTEMAS RELACIONADOS.

sistema de diseño ayudado por computador (CAD), está integrado con los FMS a través de los fuertes ramales de diseño y manufactura. Un FMS genera nuevos requerimientos en planeación de procesos y diseños, determinado por la automatización de las máquinas herramientas, por su planta y por los lechos operacionales de FMS.

las aplicaciones de los conceptos del FMS a la fabricación, al maquinado y al ensamble y su integración con los sistemas de almacenamiento automatizado y de diseño ayudado por computador podrán demostrar las completas ventajas del concepto.

Basado en la cantidad de máquinas numéricamente controladas (NC), y en su distribución, en FMS se puede dividir en cinco clases:

- 1) Módulos de Manufactura Flexible (Dupont Gatelmand,1981).
- 2) Celdas de Manufactura Flexible.
- 3) Grupos de Manufactura Flexible (Traub 1983)
- 4) Sistemas de Producción Flexible (Dupont Gatelmand 1981), Y
- 5) Líneas de Manufactura Flexible.

Una relación aproximada entre la cantidad de partes diferentes por sistema por año la tasa de producción anual por partes, para éstas cinco clases, se puede ver en la figura 414 02

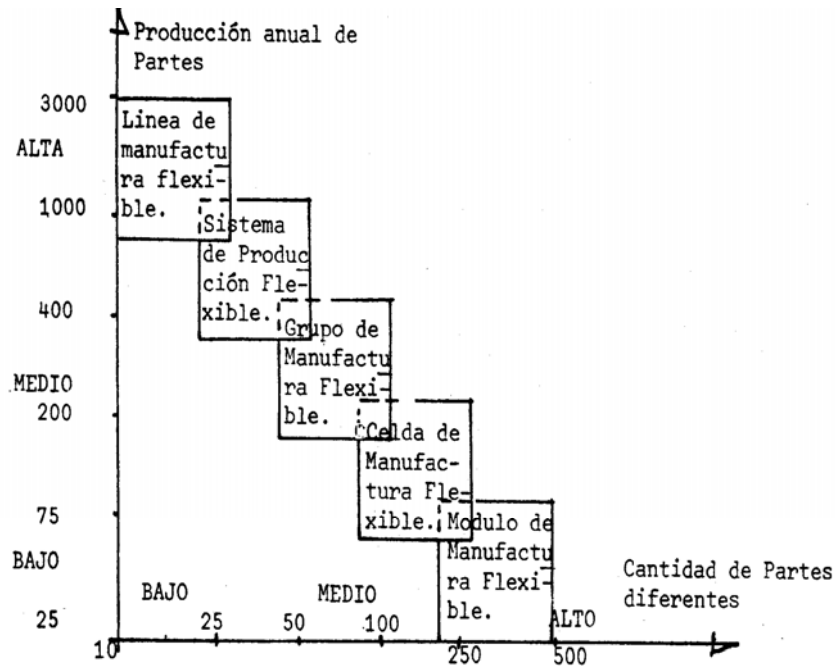


FIGURA 414 02. Relación de las diferentes clases de FMS. Cantidad de partes diferentes y producción anual de partes.

Un módulo de Manufactura Flexible, (FMM), se puede definir como una máquina aumentada con un Buffer ,(almacén), para partes, un cambiador de herramientas, un cambiador de estibas, etc.

Estos dos últimos cambiadores de pueden reemplazar por un robot.

El FMM mostrado en la figura 414 03 está compuesto de una máquina NC, un almacenamiento de partes, (Part Buffer), y un cambiador de estibas.

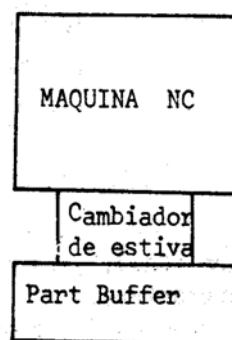


FIGURA 414 03. Módulo de Manufactura Flexible.

Una celda de Manufactura Flexible,(F11C) , se compone de. varios FMM y se puede construir de acuerdo al tipo de producto o tipo de proceso. Ver figura 414 04

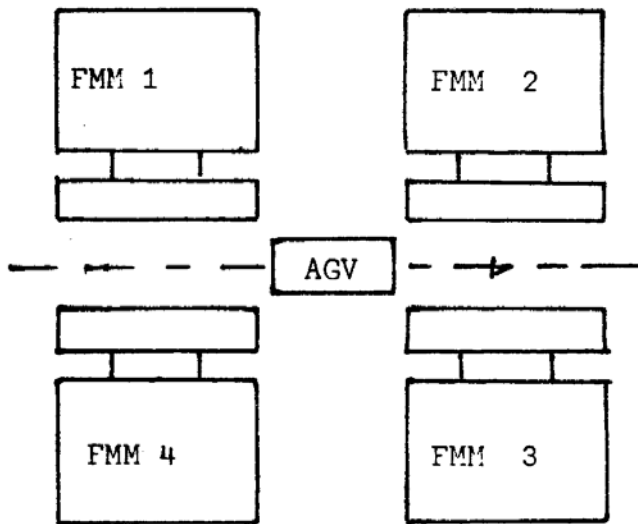


FIGURA 414 04. Celda de Manufactura Flexible. (FMC)

Un Grupo de Manufactura Flexible (FMG), es un conjunto de FMC y FMM en la misma área de manufactura, (que es fabricación, maquinado y ensamble), unidos por un sistema de manejo de materiales, (usualmente un AGVS), bajo el control de un computador común. Ver figura 414 05.



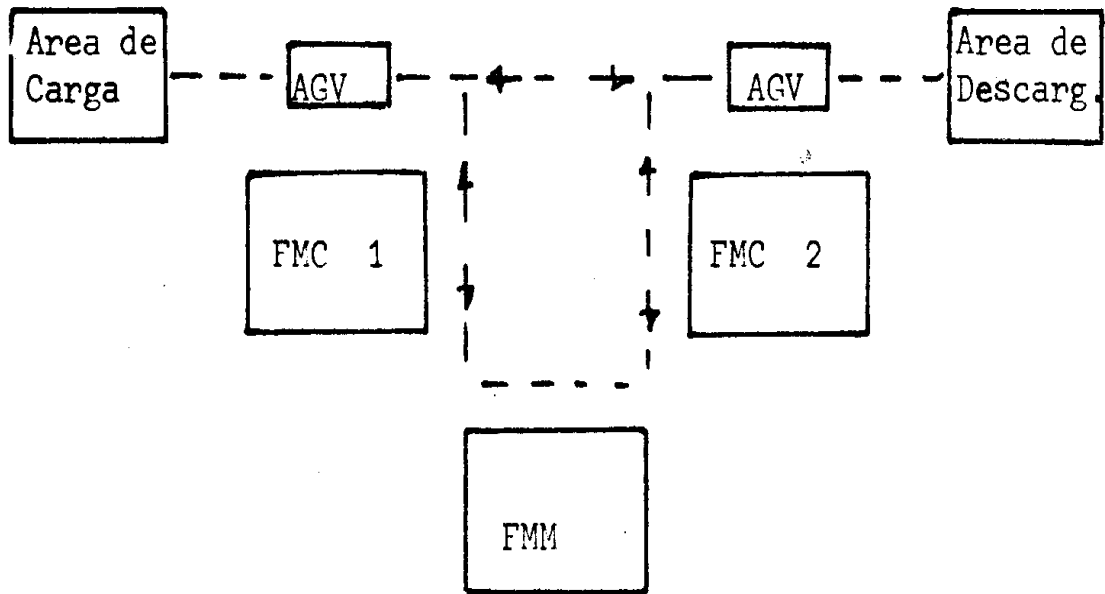


FIGURA 414 05. Un grupo de Manufactura Flexible (FMG).

Los FMC, como componentes de un FMG, pueden ser de tipos diferentes, (producto y proceso).

Un sistema de producción flexible,(FPS), contiene varios FMG representando diferentes áreas de manufactura, maquinado y ensamble, como se ve en la figura 414 06

Una línea de Manufactura Flexible, (FML), se puede definir como un conjunto de máquinas herramientas dedicadas, que se puede llamar ESTACION.

Una FML puede ser de uno de cinco tipos:

- 1) AGV
- 2) Robot
- 3) Transportador
- 4) Grúa, o
- 5) Lanzadera.

La figura 414 07 nos muestra un ejemplo de una línea AGV.

## FLEXIBILIDAD EN EL FMS.

La flexibilidad es la cualidad esencial en el FMS. Puede ser vista de muchas maneras diferentes en referencia a una medida general de flexibilidad del FMS: la medida de flexibilidad del sistema.

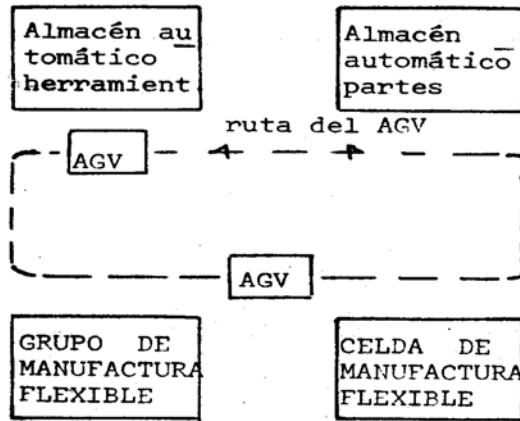
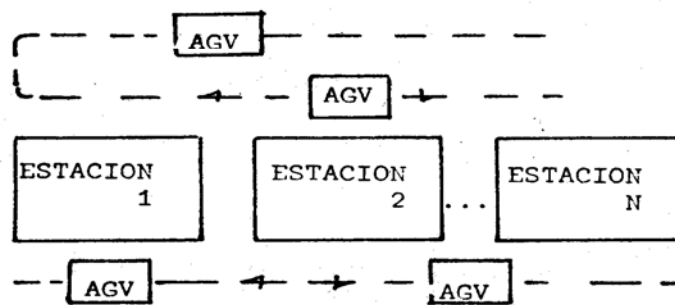


FIGURA 414 06. SISTEMA DE PRODUCCION FLEXIBLE (FPS)



Para derivar esa medida se consideran cuatro tipos de flexibilidad:

- 1) Flexibilidad del Módulo de Manufactura Flexible, (.FMM), medida por la cantidad de partes que se pueden procesar en el FMM.
- 2) Flexibilidad del sistema de manejo de materiales, (MHS), que tiene que ver con la habilidad de manejar partes diferentes en cierta cantidad de rutas diferentes.
- 3) Flexibilidad del sistema de computador medida por la adaptabilidad de las funciones de cambio.
- 4) Flexibilidad organizacional, que puede ser considerada como:
  - a) Flexibilidad del trabajo, relativa a la mezcla de partes que puede procesar el

FMS.

b) Flexibilidad de programación, medida por la cantidad de rutas diferentes a lo largo de las cuales se puede hacer un trabajo.

c) Flexibilidad a corto plazo medida por los costos de cambio entre las tareas de producción conocidas dentro del programa actual de producción.

d) Flexibilidad a largo plazo medida por los costos de parada de una nueva tarea de producción debida a los cambios en el proceso de producción. La medida de flexibilidad del sistema se puede definir como una función de las medidas asociadas con éstos cuatro tipos de flexibilidad pero se necesita investigar su cuantificación.

### **MEDIO AMBIENTE FMS.**

Todos los FMS están compuestos de tres subsistemas:

1) Administrativo

2) De Producción, y

3) de Manejo de Materiales.

Cada uno de esos subsistemas se puede a su vez descomponer en sus componentes básicos.

Un sistema de producción se puede componer de componentes como; Máquinas Centros de máquinas, cambiadores de herramientas, cambiadores de estibas, etc.

Los componentes básicos de un MHS son: vehículos guiados y robotizados, shuttle

cars, (carros lanzadera), tow lines, (carros guiados), transportadores de rodillos, etc.

Un sistema de computador controla los subsistemas de Producción y los MHS, y puede ser muy complejo, pero siempre está compuesto de un hardware de computador y de un sistema administrativo computarizado.

Las relaciones entre éstos sistemas y sus componentes Se pueden ver en la figura 414 08

El sistema administrativo se ha convertido en una parte muy importante del FMS.

Se pueden distinguir tres partes de él:

- 1) Los subsistemas de operación: Ingeniería, Inventario de Manufactura, Compras, Distribución Física, Contabilidad, Finanzas y Personal.
- 2) Un sistema de Administración de Información, MIS, y
- 3) Un sistema de soporte de decisiones, DSS.

Los subsistemas de operación llenan las funciones tradicionales de captura de información en el sistema administrativo.

El MIS alimenta a la administración del FMS con la información para tomar las varias decisiones y es un sistema pasivo para tomar decisiones.

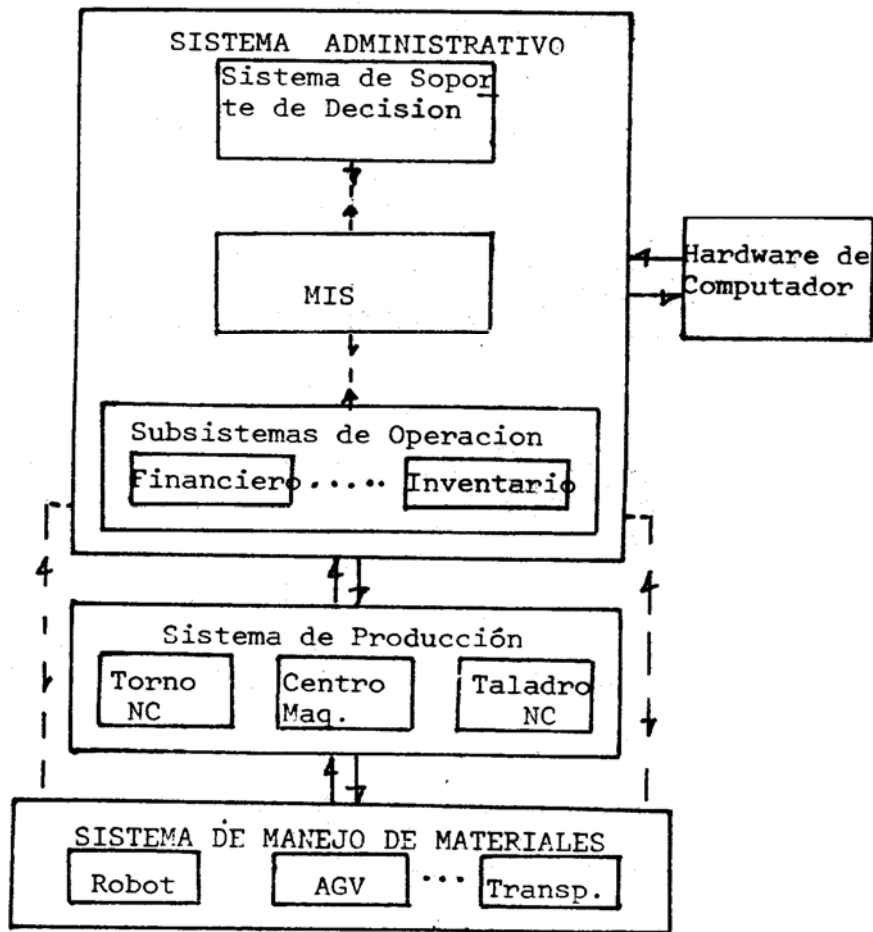
Un DSS, que aunque se encuentre en una etapa inicial de desarrollo, puede ser un soporte muy activo para las funciones administrativas.

## **LA VISION DEL PROCESO**

Una función del sistema de manufactura es producir efectivamente parte o productos.

Entonces un sistema de manufactura puede ser visto desde la perspectiva de las partes o de los productos.

Primero hay que diseñar cada parte, luego hay que generar un programa para una maquina NC, hay que programar un robot y finalmente se manufactura la parte. Ver figura 414 09.



Todos los procesos son coordinados y supervisados por un sistema administrativo.

Actualmente, cuando los cuatro procesos ilustrados en la figura 414 09, se hacen automáticamente, se tratan como si fueran completamente independientes.

Sin embargo el FMS requiere una mayor integración de todos esos procesos.

Uno podría conjeturar que, a mayor grado de automatización de un FMS, mayor la integración necesaria entre el diseño de la parte, la programación de la máquina, la programación del robot y el proceso de maquinado de partes.

## **VISION DEL PROBLEMA DE FMS.**

En el tema del FMS hay dos grupos de problemas que tienen particular importancia:

- 1) el de diseño, y
- 2) el operacional.

El primer grupo tiene que ver con la selección óptima de todos los componentes del FMS, y el segundo con su uso óptimo.

## **PROBLEMAS DE DISEÑO.**

Se pueden evitar muchas de las deficiencias en los diseños del FMS, y ya existe mucha investigación en esta área.

Para diseñar un FMS se deberán resolver los siguientes problemas:

1. El problema organizacional, o sea la selección de la familia de partes que será manufacturada puesto que la tecnología actual del FMS restringe la forma de las partes diseñadas para la manufactura flexible.
2. Selección de un sistema de producción FMS.
3. Selección de un sistema de Manejo de materiales.
4. Selección de los equipos auxiliares y estibas.
5. Selección del sistema de computador apropiado.
6. Planta e integración de todos los sistemas anteriores.

y cada uno de estos problemas es muy complejo.

## **PROBLEMAS OPERACIONALES**

Debido a que el FMS tiene un alto costo de capital, se necesita también una altísima tasa de utilización para asegurar una rápida recuperación de la inversión. y una tasa como esa solo se logra si las siguientes problemas operacionales se resuelven de manera efectiva:

- 1) Planeación 01
- 2) Agrupación
- 3) Carga de Máquinas, y
- 4) Programación.

### **1) PROBLEMAS DE PLANEACION.**

Los pronósticos y la planeación a largo plazo y a mediano plazo de los FMS, difieren mucho de los casos clásicos.

Los pronósticos están perdiendo su significado tradicional, principalmente por la flexibilidad de los nuevos sistemas.

Los horizontes de planeación largos e intermedios podrían ser aun de gran importancia pero los criterios y las restricciones podrían cambiar.

En el sistema clásico, la determinación de los valores óptimos de los parámetros de producción, (velocidad de corte y tasa de alimentación), se asumía que no estaban influidos por un planificador de producción que podía usar algunos otros parámetros tales como las horas extras o la cantidad de trabajadores.

Estos dos últimos parámetros no funcionan de la misma manera en un FMS, debido al alto grado de automatización.

Para influenciar la tasa de producción, el modelo de planeación del FMS tiene que incorporar los parámetros de producción como variables de decisión.

Esto también influencia la forma del Fa en el modelo de planeación y cambia las restricciones.

Sería difícil presentar una formulación de un problema de planeación que pudiese ser válido para todos los tipos de FMS.

Se usa la notación siguiente para presentar una formulación típica.

$i$  = índice de parte  $i \in I$

$t$  = índice de tiempo  $t \in T$

$h_{it}$  = costo de mantenimiento de inventario de la parte "i" en el período "t".  
 $P_{it}(X_{it}, C_t)$  = Función de producción para la parte "i" en el período "t"

$d_{it}$  = demanda de la parte "i" en el período "t".

$t_i$  = tiempo de producción de la parte "i".

$C_t$  = cota superior de la capacidad de producción en el período "t"

Las variables de decisión son: .

$X_{it}$  = Cantidad de partes "i" que serían producidas en el período "t".

$I_{it}$  = Inventario de la parte "i" sobrante al final del período "t"

$C_t$  = capacidad de producción en el período "t".

$$(P1) \min \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} P_{it}(X_{it}, C_t) + h_{it} I_{it} \quad (1)$$

$$y \quad I_{it-1} + x_{it} - I_{it} = d_{it} \quad (2)$$

$$\text{donde } \sum_i t_i x_{it} \cdot LE \cdot c_t \text{ para todo } i \in I, t \in T \quad (3)$$

$$c_t \cdot LE \cdot \bar{c}_t \text{ para todo } t \in T \quad (4)$$

$$x_{it}, I_{it} \cdot GE \cdot 0 \text{ y son enteros para todo } i \in I, t \in T \quad (5)$$

$$y \quad c_t \cdot GE \cdot 0 \text{ para todo } t \in T \quad (6)$$

La formulación P1) es similar a la formulación clásica presentada por Peterson y Silver en 1979, excepto que la función objetivo que incluye la función de producción  $P_{it}(X_{it}, C_t)$  Y que hay una variable adicional "Ct".

Asumiendo que "Ct = constante (t) :'" y que " $P_{it}(x_{it}, C_t) = Pit$  1, (donde Pit es el costo de producción de la parte "i": en el período "t" , para todos los valores de "i" y de "t", el problema P1) se reduce al problema clásico formulado por Peterson y Silver.

Análisis detallados del problema P1) para un FMC indican que la función de producción  $P_{it}(x_{it}, C_t)$  es fuertemente no lineal.

En el problema P1) "Ct" es una variable de decisión particularmente importante para un FMS donde no son aplicables las políticas clásicas de



salarios.

Sin embargo la capacidad "Ct" puede variar, cambiando por ejemplo la velocidad de corte y las tasas de alimentación y éstas a su vez pueden influenciar los costos de producción.

Otro factor que influye sobre los costos de producción es el costo de suministro de herramientas que típicamente se incrementa con la velocidad de corte y con las tasas de alimentación.

El problema P1) se puede describir como un problema de programación entera mixta a grande escala, (con  $X_{it}$ ,  $l_{it}$  enteros y  $C_t$  continuos), y con una FO no lineal.

En las prácticas de planeación de FMS, una función de producción lineal puede llegar a ser satisfactoria.

Tal función podría ser, por ejemplo:

$$P_{it}(X_{it}, C_t) = a_{it}x_{it} + b_{t}c_t$$

Donde "a<sub>it</sub>" y "C<sub>t</sub>" son constantes para todo "i ∈ I y t ∈ T".

Esta suposición es útil para la solución del problema P1) pero todavía el problema es difícil de resolver debido a condiciones de integridad. Se puede resolver más efectivamente reduciendo su tamaño por agregación.

Se pueden agregar las partes en familias, lo que reducirá la cardinalidad del conjunto "I".

### **PROBLEMAS DE AGRUPACIÓN.**

En algunas clases de FMS, la agrupación de partes y de algunos de los componentes de los sistemas de producción son deseables para reducir el tamaño de los problemas de carga.

Por analogía a la tecnología de grupo (GT), estos grupos se llaman:

Un grupo de máquinas, un FMC

Un grupo de partes, una familia de partes

Un grupo de auxiliares, una familia de auxiliares

Un grupo de prensas, una familia de prensas.

De ésta agrupación de partes y de componentes de sistemas de producción sería deseable obtener una situación disjunta cómo la mostrada en la figura 414 10, donde es evidentemente mucho más fácil administrar cada uno de los subsistemas 1 a N que todo el FMS.

En la práctica siempre habrán algunos traslapes entre los subsistemas 1 a N.

El concepto de agrupación de partes y máquinas se explica en el ejemplo siguiente. Considere la matriz de incidencias:

Número de parte

$$A = [a_{ij}] = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{Número de parte} \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} & & & & \\ & 1 & & & \\ 1 & & 1 & & \\ & 1 & & 1 & \\ & & 1 & & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} \begin{matrix} \text{Número de} \\ \text{máquina} \end{matrix}$$

Donde  $a_{ij} = 1$  si la parte "j" se procesa en la máquina "i"  
 $a_{ij} = 0$  el resto

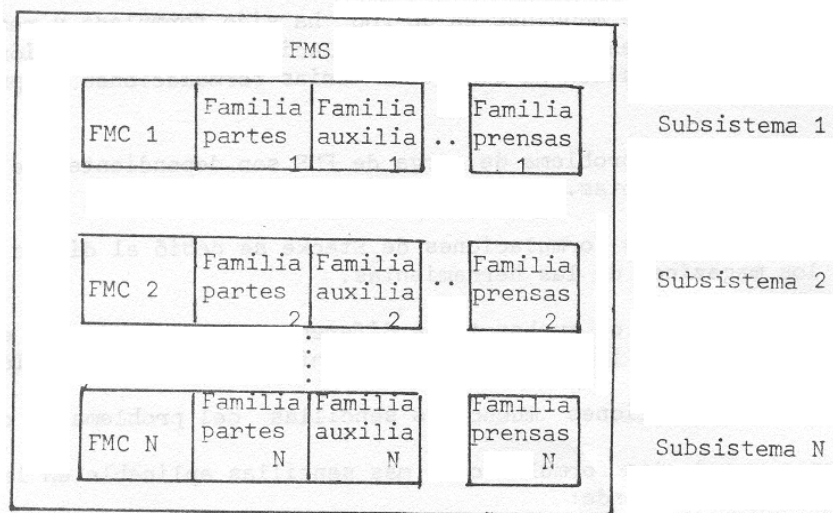


FIGURA 414 10. Estructura disjunta de los componentes de producción y partes de un FMS.

Reordenando filas y columnas en esa matriz, se genera la siguiente matriz A'.

$$A' = [a'_{ij}] = \begin{array}{c} \begin{array}{cc} \text{Familia de} & \text{Familia de} \\ \text{partes 1} & \text{partes 2} \end{array} \\ \begin{array}{cccc|cc} 5 & 1 & 3 & 2 & 4 & & \\ \hline 1 & 1 & 1 & & & & \\ \hline 1 & & 1 & & & & \\ \hline \textcircled{1} & & & 1 & 1 & & \\ \hline & & & 1 & 1 & & \\ \hline & & & & & & \end{array} \end{array} \begin{array}{l} 2 \text{ FMC 1} \\ 4 \\ 3 \text{ FMC 2} \\ 1 \end{array}$$

En ésta última matriz, se pueden distinguir fácilmente dos familias de partes y dos FMC ,(que son las submatrices con líneas punteadas).

Todas las partes de la familia 1, excepto la parte 5 son procesadas en el FMC 1. y todas las partes de la familia 2 se procesarán en el FMC 2.

Hay que tener cuidado especial para programar la parte 5 que será procesada en los FMC.

La agrupación de partes y de otros componentes de los sistemas de producción se puede lograr de una manera análoga a éste agrupamiento de partes y máquinas.

Varios autores han publicado algoritmos para resolver los problemas de agrupamiento.

### **EL PROBLEMA DE CARGA DE MAQUINAS. (BALANCEO DE CAPACIDAD).**

Un problema de planeación a corto plazo, (un mes), para cualquiera de los FMC que resulta del agrupamiento de partes y componentes de los sistemas de producción también puede ser difícil de resolver debido a su complejidad.

Ese problema se puede resolver aplicando el procedimiento de dos etapas: 1) Carga de máquinas, y 2) Programación, el cual descompone el problema de planeación a corto plazo en subproblemas que podrían ser resueltos más fácilmente.

Desafortunadamente las soluciones óptimas para estos dos problemas, (carga de máquinas y programación), no es necesariamente óptima para el problema de planeación a corto plazo.

Sin embargo el riesgo se puede disminuir si el problema de carga de máquinas se formula correctamente.

El problema de carga de maquinas en un FMS ha sido formulado y resuelto por muchos autores, y Stecke presento una de las formulaciones de programación entera no lineal más complejas, y Kusiack ha discutido varias formulaciones de programación entera.

Las formulaciones del problema de carga de FMS son dependientes de la máquina y del diseño de las herramientas.

La no linealidad en las formulaciones de Stecke se debió al diseño de las herramientas y de los magazines de las herramientas.

Actualmente se dispone de muchos tipos diferentes de magazines y en la mayoría ellos, la secuencia de las herramientas no influye sobre su capacidad.

Esto permite formulaciones del problema de carga de un FMS.

Consideremos una de las formulaciones más sencillas aplicable en la práctica, sentada por Kusiack, donde:

$i$  = Índice de operación  $i \in I$

$j$  = índice de maquina  $j \in J$

$C_{ij}$  = costo de procesar la operación "i" en la máquina "j"

$T_{ij}$  = duración del proceso "i": en la máquina "j"

$a_i$  = cantidad de operaciones "i" requeridas,

$b_j$  = tiempo disponible de proceso en la máquina "j "

$k_i$  = espacio de herramienta ,(cantidad de ranuras), ocupadas en el magazine de herramientas por herramientas necesarias para la operación "i",

$f_j$  = capacidad del magazine de herramientas en la máquina "j".

$n_i$  = cantidad máxima de máquinas que pueden hacer la operación "i"

$X_{ij}$  = cantidad de operaciones "i" que se procesarán en la máquina "j"

$Y_{ij}$  = si la operación "i" se procesa en la máquina "t"

= 0 si no.

y el problema de la carga se puede formular así:

Y el problema de la carga se puede formular así:

$$P2) \quad \text{MIN} \quad \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} x_{ij} \quad (9)$$

$$\text{c.s.r.} \quad \sum_{j \in J} x_{ij} = a_i \quad \text{para todo } i \in I \quad (10)$$

$$\sum_{i \in I} t_{ij} x_{ij} \leq b_j \quad \text{para todo } j \in J \quad (11)$$

$$\sum_{i \in I} k_i y_{ij} \leq f_j \quad \text{para todo } j \in J \quad (12)$$

$$\sum_{j \in J} y_{ij} \leq n_i \quad \text{para todo } i \in I \quad (13)$$

$$x_{ij} \geq 0 \text{ y entero para todo } i \in I, j \in J \quad (14)$$

$$y_{ij} = 0,1 \text{ para todo } i \in I, j \in J \quad (15)$$

La restricción (10) asegura que la cantidad de operaciones requeridas "i" sea igual a "a<sub>i</sub>".

La desigualdad (11) dice que no se puede exceder el tiempo disponible en cada máquina.

La restricción (12) tiene que ver con la capacidad de los magazines.

La restricción (13) limita la cantidad de maquinas que pueden procesar las mismas operaciones.

La integridad de las variables de decisión "x<sub>ij</sub>" está impuesta por las restricciones (14) y (15) respectivamente.

El problema P2) es aplicable a muchos de los FNS existentes hoy por hoy. Por ejemplo a un FMG que existe en la Okuna Machinery Works Ltd. de Japón. Ver FIGURA 414 11

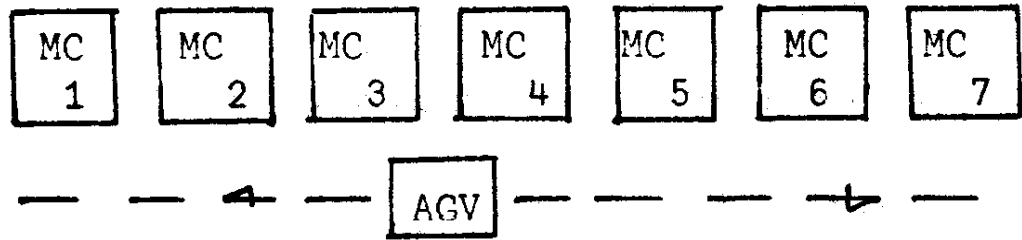


FIGURA 414 11. Una planta FMC.

Este sistema tiene siete centros de maquinado idénticos (MC) unidos por un AGV.

Debido a la variedad relativamente pequeña de partes, éste conjunto de siete MC, se puede dividir lógicamente en dos o más celdas de maquinado (FMC).

Las fechas de entrega y la relativamente pequeña variedad de partes permite naciones de lotes idénticos de operaciones, (lo conocido como lote), a más de centro de maquinado.

La cantidad de centros de maquinarlo que tienen que ser visitados por cada uno de los lotes, es, sin embargo limitada debido a la reducción que un AGV visita los centros de maquinado y mejorando la utilización de la capacidad del vehículo.

Por supuesto que la cantidad de centros asignados al mismo lote está limitado por la restricción de capacidad del magazine de herramientas.

Donde las restricciones de las capacidades de los magazines que asignar un lote a solamente un centro de maquinado.

Muchos FMS se diseñan para manejar una gran variedad de partes en pequeños lotes y cada lote puede requerir una cantidad relativamente grande de herramientas. En tales casos, el problema de carga P2) se puede simplificar y obtener el problema:

$$\begin{aligned}
 P3) \quad & \text{MIN} \quad \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} y_{ij} \\
 \text{s.a.} \quad & \sum_{j \in J} y_{ij} = 1 \quad \text{para todo } i \in I \quad (17)
 \end{aligned}$$

$$\sum_{j \in J} t_{ij} y_{ij} \leq b_j \quad \text{para todo } j \in J \quad (18)$$

$$\sum_{i \in I} k_i y_{ij} \leq f_j \quad \text{para todo } j \in J$$

$$y_{ij} = 0,1 \quad \text{para todo } i \in I, j \in J \quad (20)$$

Todos los parámetros de éste problema se refieren a lotes, al contrario del problema P2) donde se refieren a operaciones.

La restricción (17) asegura que cada lote ;i" se procesa en exactamente una máquina

"j" .

El significado de las restricciones (18) , (19) , y (20) es el mismo que el de las restricciones (11) ,(12) y (15) respectivamente en P1).

Una razón que explica la poca aplicación de los modelos de investigación de operaciones en la práctica, es la necesidad de datos. O se requieren muchos o son de difícil consecución.

Consideremos por ejemplo, los coeficientes de costo "Cij": en los problemas P2)

P3).

Sería muy difícil aplicar una de éstas dos formulaciones si los valores de "Cij" no se generaran automáticamente.

Este problema de datos se puede resolver simplemente asumiendo que "Cij = tij" o en el caso de maquinas idénticas, (como por ejemplo en la figura 414 10), de que Cij = 1, para todo iEI , jEJ .

Kusiack ha dado otros detalles para el problema de carga de máquinas.

#### **4) PROBLEMA DE PROGRAMACION**

Se han gastado muchísimos esfuerzos en los sistemas de manufactura tradicionales para resolver el problema de programación.

Sin embargo en el FMS, debido a los altos costos de los componentes, el problema

la programación es solamente una de las partes de la programación.

El problema de programación en el FMS es un problema multicriterio que incluye:

- 1) Programación de partes.
- 2) Programación de estibas y auxiliares
- 3) Programación de herramientas, y
- 4) Programación del sistema de manejo de materiales (AGVS).

Este, problema multicriterio es extremadamente difícil de resolver, y por eso es más

conveniente considerar de manera separada cada uno de los cuatro subproblemas, aun que cada uno de ellos puede ser muy difícil de resolver en la práctica.

Si cada uno de los cuatro problemas de programación se resuelve separadamente, entonces la pregunta que surge sería cual resolver primero, y la solución de éste tendrá impacto sobre la solución de los otros tres.

Tradicionalmente el problema de programación de partes ha sido de gran interés, principalmente debido a la tendencia de altísima utilización de las máquinas herramientas.

Así como las máquinas herramientas son los mayores factores de costo de un sistema de manufactura, parece que un enfoque como éste es correcto.

Este puede no ser el factor dominante en un FMS.

Sin embargo en muchos FMS el costo de las máquinas herramientas es cerca del 65% de los costos totales del sistema y éste porcentaje puede reducirse si se incrementa el grado de automatización y computarización.



y ésta a su vez, puede cambiar las prioridades de la programación.

## **EL PROBLEMA DE LA PROGRAMACION POR PARTES**

La carga de la máquina con partes simplifica el problema de programación por partes, asumiendo que:

1. Solo una operación se hace sobre una parte "i" y
2. Cada parte "i" se puede procesar en 1, 2 o 3 máquinas.

De hecho, la primera suposición se aplica a muchos de los FMS existentes.

Un ejemplo puede ser un FMC en una fábrica sueca. Puesto que el FMC se integra con el medio de manufactura clásico y con la organización del proceso de manufactura, gran cantidad de partes requieren que se les haga solo una operación en un FMC.

Sin embargo ésta operación puede ser compleja.

Puede estar compuesta de cierta cantidad de operaciones elementales, tales como: roscado, perforación, rectificado, etc.

Además, un centro de maquinado no solamente se carga con una pieza sino con un conjunto de piezas dispuestas en un medio auxiliar.

Esta estrategia de carga incrementa el tiempo de proceso de carga de un centro de maquinado sencillo. (UN conjunto de partes tiradas en una bodega auxiliar).

En la empresa del ejemplo, el tiempo de proceso típico de carga son 30 minutos.

La segunda suposición es totalmente aceptable en la práctica.

Probablemente en muchos casos "ni" tienda a "1".

Con éstas dos suposiciones, el problema de programación de partes se descompone en subproblemas de programación con una, dos o tres máquinas, para  $n_i = 1, 2, \text{ o } 3$ .

Los problemas de programación con una o dos máquinas, y el caso especial de un problema de programación con tres máquinas puede ser resuelto bien y muy fácilmente.

Existen algoritmos de complejidad  $O(n \log n)$ , para resolver el problema de programación en una sola máquina.

El tiempo de corrida en un computador, para un problema de 1000 partes, es del orden de pocos segundos.

El relajamiento de la primera suposición de proceso de una sola parte en una máquina, nos conduce a problemas de programación con restricciones de precedencia.

Se encuentran en la literatura muchos detalles de las teorías de programación.

### **ROBOTS INDUSTRIALES EN EL FMS.**

En un FMS se pueden hacer muchas tareas usando robots. Martensson ha clasificado los robots en tres grupos: los de manejo, los de operación de herramientas y los de ensamble.

#### **ROBOTS DE MANEJO**

Los robots típicos de manejo transfieren un objeto, (por ejemplo una herramienta o un artículo), desde un punto a otro y tienen una gran variedad de aplicaciones en el FMS.

Definitivamente la más común es la carga y descarga de la máquinas herramientas

con partes y con herramientas.

Las partes rotativas? se cargan directamente? mientras que las partes prismáticas se cargan con estibas.

La carga y descarga de las máquinas se puede hacer con robots o con cambiadores de estibas, teniendo, claro está, en cuenta el peso límite que pueden manejar los robots.

Se han hecho algunos intentos para aplicar los robots de manejo al cambio de soportes de partes, (como echar, tirar), pero ésta es una tarea muy difícil de hacer.

Por ejemplo la remoción de astillas, cáscaras, virutas desde las máquinas, es una tarea que también se considera difícil.

En la mayoría de los casos, la carga y descarga de estibas con partes se hace manualmente debido a la gran variedad de formas de los artículos y a su orientación casi aleatoria.

Los sistemas de visión muy pronto incrementarán el alcance de las aplicaciones de

los robots.

Y las labores de almacenamiento presentan una gran alternativa de aplicación de los robots de manejo, por ejemplo en las labores de estibado y desestivado de artículos.

### **ROBOTS MANEJADORES DE HERRAMIENTAS.**

Las aplicaciones más comunes de los robots manejadores de herramientas son:

- 1) Cubrir, revestir, (pintar o proteger por debajo)
- 2) Soldadura de punto,
- 3) Soldadura Eléctrica.
- 4) Maquinado ,(taladrado), y
- 5) Recortado ,(trimming).

### **ROBOTS DE ENSAMBLE**

Las operaciones más típicas de ensamble son: la transferencia y empate de partes.

En promedio, el tiempo para hacer éstas operaciones es mucho más corto que el de

las operaciones de maquinado.

Las operaciones de ensamble podrán ser el área más amplia para las futuras aplicaciones de los robots.

Los robots de ensamble podrían llegar a dominar situaciones como las siguientes: variedad de artículos, variedad de orientaciones de esos artículos, manejo de artículos defectuosos, ensamble de productos diferentes en la misma línea flexible de ensamble.

### **VEHICULOS ROBOT.**

En particular los FMS han generado una demanda por dispositivos que cuenten con

las ventajas de los robots y de los AGV y que se llaman vehículos robots.

Los vehículos robot pueden ejecutar muchas tareas importantes en los FMS tales como: cargasen y descargasen ellos mismos, llevar una carga de un lugar a otro y cargar y descargar las máquinas herramientas.

También hay algunos otros hechos que pueden ser importantes en los vehículos robots tales como el posicionamiento preciso, el viaje en dos direcciones por la misma ruta controlada y la capacidad propia de autodiagnosticarse cuando tenga problemas.

Muchos autores, como Kusiack, ya han discutido ampliamente las variables relativas a los vehículos robots.

## **SISTEMAS DE VISION**

Las aplicaciones de los robots en los FMS han generado tremenda demanda por los sistemas de visión.

La visión de los robots se puede definir como un medio destinado a entenderse con

la incertidumbre de la posición del artículo o del robot.

Rosen ha resumido las funciones deseadas para los sistemas de visión aplicables a manipulaciones controladas por sensores, de la siguiente manera:

- 1) Reconocimiento de partes y ensambles y/o reconocimiento del estado estable cuando se necesite.
- 2) Determinación de la posición y orientación de las partes y ensambles relativas a un sistema predeterminado de coordenadas.
- 3) Localización y extracción de las facciones sobresalientes de una pieza o ensamble para establecer una referencia espacial para reconocimiento visual, y
- 4) Inspección en proceso. La verificación haciendo o se hizo de manera satisfactoria.

Estas funciones son fácilmente aplicables a los FMS.

Comparando las funciones anteriores con las funciones especificadas previamente para los robots en un FMS, se pueden enumerar los siguientes cuatro grupos de sistemas de visión:

- 1) Manejo
- 2) Operaciones de herramientas
- 3) Ensamble, y
- 4) Inspección.

Los primeros tres grupos de sistemas de visión son idénticos a los correspondientes

grupos de robots industriales.

El último grupo, el sistema de visión para inspección, podría incluirse en el primero, porque, en muchas aplicaciones de inspecciones de partes, el sistema de visión tiene que trabajar conjuntamente con un robot industrial, que por ejemplo tiene que retirar los artículos defectuosos.

Sin embargo se pueden encontrar aplicaciones donde los sistemas de visión - inspección actúan independientemente.

De la misma manera que los robots industriales, cada uno de los sistemas de visión se puede instalar en un AGV.

Muchos autores igualmente han discutido ampliamente el tema de las aplicaciones de los sistemas de visión en los FMS.

### **MODULARIDAD EN LOS FMS**

La modularidad se ha convertido en el principal tema del FMS debido a que incrementa muchísimo la flexibilidad del sistema y reduce sus costos totales.

La modularidad en los FMS tiene que ver con el diseño de:

- 1) Máquinas Herramientas.
- 2) Herramientas,
- 3) Dispositivos auxiliares, auxiliares, accesorios fijos
- 4) Sistema de manejo de Materiales

5) Sistemas de Computador, y

1) Lenguajes.

### **TENDENCIAS FUTURAS EN EL DESARROLLO DE LOS FMS.**

Es difícil pronosticar la dirección exacta del desarrollo del FMS.

Sin embargo se enfatiza en las dos siguientes tendencias:

1) Sistemas de grande escala en los cuales los controles de software acercan todos

los aspectos de los procesos tecnológicos de diseño y manufactura.

2) Sistemas autónomos pequeños, controlados con microcomputadores que le dan al sistema operación con herramientas altamente sofisticadas que agregan mucha versatilidad, destreza y experiencia.

La primera tendencia asume que un sistema de manufactura será solamente una pequeña parte del sistema de computación.

Aún es muy prematuro pronosticar cual de las dos tendencias prevalecerá en el futuro.

Considerando la variedad de FMS que ya se han implementado, probablemente cada una de las cinco clases de FMS tendrán su puesto en la industria.

### **CONCLUSIONES.**

La literatura que trata con los FMS es muy reciente. Aquí solamente se dan luces Sobre varios de los problemas que tienen los FMS. y algunos de esos se han definido por primera vez y pueden ser objeto de posterior investigación.

y se espera que todas las ideas presentadas acá contribuyan a una mejor comprensión de los FMS. .