

## **CAPÍTULO 1**

**MARCO GENERAL DE TESIS: ANTECEDENTES, DEFINICIÓN DEL PROBLEMA,  
JUSTIFICACIÓN, HIPÓTESIS Y OBJETIVOS, ALCANCE Y LIMITACIONES.**

### 1.1 Antecedentes

En los últimos 30 años se han desarrollado estrategias de fabricación orientadas a cumplir objetivos específicos como son las mejoras al diseño, manufactura y calidad de los productos. Ha sido posible desarrollarlos debido a los avances tecnológicos introducidos por científicos e ingenieros, los cuáles han aprovechado muy eficientemente el uso de computadoras y programas de cómputo. De igual forma ocurrió con el arribo al mundo de la industria, de los equipos completamente automatizados como lo son los equipos de control computarizado para tareas de corte, maquinado y mecanos posicionadores de componentes. Sin embargo, los pisos de planta de las fábricas más avanzadas del mundo se vieron repentinamente invadidos por una unidad llamada robot. Con robots, computadoras y lenguajes avanzados de programación la manufactura cambió radicalmente. Por eso, los escenarios de competitividad más feroz se encuentran ahora en los mercados más importantes del mundo. Con la llamada “mundialización” de los mercados la palabra local ha pasado a ser una pieza de museo. Para nadie es un secreto que toda competencia tiene al mundo entero como mercado. Paralelamente el desarrollo de los Sistemas Avanzados de Manufactura ha traído como consecuencia una reducción en los costos y tiempos de ciclo de fabricación y un incremento significativo en la calidad del producto. La presión en los mercados, ejercida entre competidores y las exigencias de los clientes, han transformado las reglas para la fabricación de bienes. Las empresas multinacionales poderosas o los grandes líderes mundiales de manufactura, crean espacios de competencia para grandes inversionistas. Es decir un espacio privilegiado donde el pasaporte al campo de juego son las cifras multimillonarias en dólares, que para ellos, es un asunto de rutina. Para las micros, pequeñas y medianas empresas de cualquier país avanzado existen vías de crédito con bajas tasas de interés. No ocurre así en nuestro país y esto provoca una desventaja para competir. A pesar de los grandes avances en manufactura, todavía más de un 90% de la industria mexicana utiliza los métodos tradicionales de fabricación, como línea de producción, celda de manufactura manual y tecnología de grupo. Así los Sistemas Avanzados de Manufactura: Flexible, Esbelta, Seis Sigma e Integrada por Computadora son un factor de permanencia para la industria que tiene el propósito de aumentar su competitividad, no sólo para ingresar a los mercados, sino para igualar o superar a sus competidores en cualquier parte del orbe.

## **1.2 Definición del problema**

Nuestro país se encuentra en un claro proceso de desarrollo y escalando mejores lugares en el listado de fortaleza económica. La industria mexicana, en su encuentro con un alud de competidores de clase mundial, no puede ni debe retrasar las iniciativas de desarrollo tecnológico así como la asimilación de tecnologías extranjeras exitosas. Entre las tecnologías de interés, debe incluirse la manufactura, por obvias razones de importancia y por su contribución vital a la economía del país. Tradicionalmente los empresarios mexicanos han sido proclives a la importación de equipos y tecnologías de las potencias económicas. Con esta política empresarial se fomenta la dependencia tecnológica y se inhibe la posibilidad de estimular a los científicos e ingenieros mexicanos al desarrollo de tecnología propia. De tal forma que se cancela por propia elección, la oportunidad de librarse de ser la única de las 12 potencias económicas del mundo, que no crea tecnología y que no produce las máquinas más avanzadas para su propia industria de manufactura. El atraso que representan más de 30 años de rezago tecnológico, nos obliga como país, a preparar hoy una fuerza laboral técnica y profesional conocedora de las tecnologías de diseño, manufactura y calidad modernas. Existe un escaso conocimiento de los Sistemas Avanzados de Manufactura en la industria nacional. Las Universidades, Tecnológicas e Institutos de Investigación no han evaluado con seriedad y talento la oportunidad de ser los agentes y motores del cambio tecnológico. Continúan con su bajo perfil y falta de interacción a gran escala con el mundo real de la industria y sus necesidades, han hecho una labor pasiva y muy pobre en lo relativo a la tecnología, que para nuestra calidad de potencia económica, debería ser una de sus más importantes misiones institucionales. El problema central es la falta de conocimiento experto en el campo de los Sistemas Avanzados de Manufactura.

## **1.3 Justificación del Tema de Tesis**

México nunca se ha distinguido por ser un país generador de tecnología. Hemos sido asimiladores de tecnologías importadas. Las nuevas tendencias tecnológicas, aunadas con la apertura de los mercados del mundo, cambiaron drásticamente las reglas de sobrevivencia y éxito para las empresas. Nuestro país podría terminar como “gran maquilador” de seguir con el mismo derrotero en educación, ciencia e ingeniería. Como el status general de cosas parece no cambiar, requerimos dar respuesta certera a lo que seguramente para nuestro país será el problema crítico: la sobrevivencia exitosa de la micro, pequeña y mediana industria

mexicana. La gran empresa y los poderosos corporativos han resultado ser los mejores clientes para las tecnologías producidas en las potencias económicas del mundo, por lo que adquirir la misma tecnología del competidor, cuando está disponible, sólo es un problema de dinero. Las complicaciones vienen cuando el creador de la nueva tecnología de punta, no está dispuesto a compartirla y se reserva el liderazgo mundial en su campo. El caso crítico para nuestro país se encuentra en el universo de la micro, pequeña y mediana industria, la cuál no posee ni la preparación, ni el conocimiento y mucho menos los recursos económicos para hacer frente a las nuevas tendencias del diseño, manufactura y calidad. Es importante tomar previsiones en su justa dimensión, porque el tema en cuestión: los Sistemas Avanzados de Manufactura dominarán la industria durante los próximos 30 años. Es urgente crear los mecanismos para prepararnos ante lo inevitable. Requerimos, como condición plausible, que todos los protagonistas del esfuerzo tecnológico inicien a gran escala, desde la divulgación del tema hasta el entrenamiento y capacitación de los operarios, técnicos y profesionales mexicanos que laborarán en la próxima generación de Sistemas Avanzados de Manufactura. Contribuir en este sentido, aunque en una forma insignificante, es el motivo que justifica el presente trabajo de tesis.

#### **1.4 Hipótesis y Objetivos**

El trabajo de esta tesis debe observarse como una modesta contribución del autor, al titánico esfuerzo que debe realizar nuestra Nación en el dominio de los sistemas avanzados de manufactura. El contenido de los capítulos abarca el marco conceptual, las características generales, los recursos avanzados de manufactura, el tratamiento matemático de problemas clásicos, un sencillo análisis comparativo, indicadores de mejora proporcional, casos de aplicación real en México y en los Estados Unidos de América, así como una guía descriptiva de los Sistemas Avanzados de Manufactura. Este material se complementa con las conclusiones derivadas de los contenidos en los capítulos expuestos y material recopilado de la literatura técnica especializada de nivel internacional. Se espera que el material sirva de apoyo para futuros trabajos de tesis con mayor profundidad científica y técnica así como mayor precisión en el enfoque temático. Cada uno de los Sistemas Avanzados de Manufactura merece, por sí solo, una tesis de grado completa. En el presente trabajo se tiene como objetivo. mostrar una visión general de los Sistemas Avanzados de Manufactura y en la búsqueda de un objetivo práctico, la tesis pueda ser leída y comprendida (a excepción de los tratamientos

matemáticos) por quienes carecen de preparación en ciencias e ingeniería, pero expertos en el manejo de micros, pequeñas y medianas empresas e interesados en las nuevas tendencias competitivas de clase mundial.

El trabajo se desarrolló para demostrar, en principio, la siguiente:

### HIPÓTESIS

**Existe un sistema de diseño, manufactura y calidad de máxima efectividad y de muy bajo costo comparativo con otros sistemas tradicionales o avanzados, que es adecuado para su aplicación en la micro, pequeña y mediana industria mexicana para desarrollar una alta competitividad mundial. El objetivo central del presente trabajo es demostrar que tal sistema existe, que es identificable, o bien, que puede ser construido a partir de los sistemas avanzados de manufactura existentes.**

#### 1.5 Alcance y Limitaciones

El tratamiento de los Sistemas Avanzados de Manufactura es un trabajo que requiere de paciencia y búsqueda meticulosa de información. Para abarcar aspectos fundamentales y complementarios relativos al diseño, manufactura y calidad, se necesita en rigor, la selección juiciosa de lectura de libros, publicaciones, artículos científicos, memorias de congresos, reporte de asociaciones, estudios y reportes de caso, estudios comparativos y competitivos así como literatura técnica y de ingeniería muy especializada. Si se es afortunado, como sucedió en este caso, se puede contar con el consejo experto del asesor de tesis y de consultores y colegas de la profesión, con su vasto abanico de experiencias. A decisión del autor, no fue conveniente tratar con profundidad cada tema de interés, porque hubiese hecho de esta tesis, un trabajo interminable. Por tal motivo, el alcance del presente trabajo se limitó a una selección de temas coherentes que a juicio del autor, son de suma importancia para comprender el campo de los Sistemas Avanzados de Manufactura y para la demostración de la hipótesis. Asimismo, se buscó equilibrar contenido y extensión. Se evitó, en lo posible, los tratamientos matemáticos profundos y rigurosos que lo hubiesen convertido en material de uso exclusivo del Asesor de tesis y de los Sinodales del examen de tesis de grado. Por el contrario, se intentó convertirlo en un material sencillo y claro sin perder formalidad. Se realizó con una expectativa de rebasar las futuras y esporádicas consultas de biblioteca, pero sólo el interés de los lectores de post-grado podrá confirmarlo. Es importante consignar que las conclusiones, sólo son válidas al interior de este escrito, independientemente de que la literatura especializada confirme su validez general. Se tuvo la oportunidad de

presentar material único, inédito y exclusivo acerca de la aplicación de los sistemas, pero evidentemente se impuso la ética profesional, la honestidad personal y el respeto a la propiedad intelectual.

Sin lugar a dudas, el material presentado no pudo ser perfectamente imparcial y quizá se advierta un énfasis preferencial, claramente limitado por la formación profesional, experiencia y campos de interés personal del autor de esta tesis.

## **CAPÍTULO 2**

### **EL ENTORNO DE NEGOCIOS Y SU RELACIÓN CON LA MANUFACTURA**

## 2.1 Entorno de negocios

El ambiente competitivo en los negocios, demanda como nunca antes en la historia de la industria, consideraciones muy específicas relativas no sólo a la fabricación, elaboración o manufactura, sino a todo el entorno de negocios. Esto ha obligado a entender los negocios como entidades productoras de bienes y satisfactores para cubrir la demanda de los mercados y clientes, con el propósito de generar utilidades manteniéndose altamente competitivo. En los últimos 50 años en el entorno de negocios fue una preocupación fundamental la mano de obra. De allí que los aspectos claves de la organización hayan sido dirigidos a reclutar mano de obra disponible y económica, sin importar la preparación escolar o experiencia. La demanda del mercado para obtener productos manufacturados llegó a un frenesí de consumo que cualquier producto a la venta, cual fuese su calidad, tenía asegurado su destino en manos del consumidor o usuario. Inclusive a un precio fijado con excesivos márgenes de utilidad. La gran demanda de mano de obra, por parte de las empresas de todo el mundo, obedecía a la necesidad imperiosa de asignar una multitud de tareas en las líneas de producción. Algunas de esas tareas eran tan simples como realizar el desempacado de piezas, el traslado de producto dentro del piso de fabricación, hasta aquellas consideradas como de escaso valor: limpieza de área de trabajo o carga y descarga en los almacenes. A medida que todas las empresas demandantes pudieron ver satisfechas sus necesidades de personal laboral, los esfuerzos posteriores se concentraron en las escalas de producción masiva. Considerando que las necesidades de materia prima, energía, máquinas y recursos humanos se encontraban cubiertas, el propósito de la producción fue centrado en aprovechar al máximo la capacidad instalada, aunque ello significara laborar por jornadas de 12, 14 o más horas al día.

Dejando a un lado las implicaciones de justicia laboral, la meta se replanteó súbitamente en lograr producir de acuerdo a la capacidad instalada, crear economías de escala para abastecer mercados y reducir costos por compra de materia mediante contratos de gran volumen, exclusividad y largo plazo. Con esto se lograba incrementar los inventarios a dimensiones suficientemente colosales para inundar los mercados de productos. La idea fundamental consistía en tener excedentes con los cuales distribuir en zonas geográficas cercanas a la factoría así como en regiones más apartadas a la zona de influencia de las fábricas. La anterior estrategia evidenciaba un parte-aguas en la historia reciente de la manufactura. Con lotes de producción impresionantes, las potencias industriales del primer mundo tuvieron excedentes para cubrir sus mercados domésticos y más aún, para dirigir sus productos a mercados de exportación. demandantes también de bienes manufacturados y

de consumo. La llegada de los productos americanos, británicos y rusos a los mercados mundiales alertaron a los productores de los mercados invadidos a desarrollar estrategias agresivas. Algunos países como Japón, Alemania, Francia e Italia respondieron creando las bases para establecer mecanismos de mejora para igualar la calidad, precio y servicio de los productos extranjeros. Otras naciones, como México, respondieron cerrando sus fronteras y con ellas, cerraron también por varias décadas las posibilidades de competitividad para casi todas sus industrias. Posterior al conflicto de la Segunda Guerra Mundial varias economías del bloque perdedor de este acontecimiento sufrieron pérdidas incalculables que tardarían muchos años en recuperar. Esto dejó con capacidad a las economías triunfadoras de abastecer los mercados del mundo con una oportunidad inigualable.

Como propietarios de los mercados mundiales, las potencias triunfadoras escribieron las reglas de los mercados en cuanto a precio, calidad y tiempos de entrega para la mayoría de los bienes manufacturados. Mientras esto ocurrió, el bando perdedor se enfocó a desarrollar estrategias integrales entre gobierno, industria, universidades e inversionistas para definir proyectos conjuntos de largo plazo orientados a satisfacer sus mercados domésticos. Paralelamente se orquestaba un plan para tener presencia y posteriormente conquistar los mercados del mundo. Este bloque de países tuvo muy claro que para ser competitivos tendrían que superar a sus adversarios económicos a través de productos con alta calidad y más bajo costo.

Sorprendieron a sus contrincantes por su mejora continua en calidad, precio y tiempos de entrega a pesar de encontrarse a miles de kilómetros de distancia de sus mercados. Fueron ganando participación de mercado, e incluso, se enfrentaron a una feroz competencia en los mercados domésticos de sus adversarios. Años más tarde, con estas disciplinadas estrategias, no sólo conquistaron los mercados a los que llegaron, sino que adquirieron las empresas que una vez fueron sus más encarnizadas competidoras. Semejante historia de éxito no se produjo por la casualidad, detrás del presente relato existe un camino de 30 años de esfuerzo, talento, recursos, disciplina, vocación así como una miríada de hombres y mujeres comprometidos con la realización una meta. Es de gran interés para los especialistas de la manufactura el caso de Japón, que sin contar con recursos naturales y carecer de materiales industrializables, es uno de los países productores de manufacturas más poderoso del orbe. El escenario interesante del caso japonés lo constituye, el hecho de que el problema de la excelencia en manufactura era tan sólo uno de una colección de problemas por resolver; tales como la compra de materias primas, el conocimiento de los mercados, la logística de transportación y distribución

entre otros. De igual forma lo fueron los esquemas japoneses de distribución de márgenes de utilidad entre todos los participantes en la cadena de valor. Su metodología consistió y consiste en la actualidad, en impulsar nuevas tecnologías para el diseño innovador y de alta calidad, tecnologías de manufactura avanzada, tecnologías de abastecimiento y logística, así como la más alta durabilidad y confiabilidad en sus productos y bienes de capital (equipos industriales, máquinas, robots, etc.). Pero lo anterior fue hecho considerando una conservación parcial de su tecnología tradicional basada en mano de obra intensiva. Los japoneses comparten con los Estados Unidos de América y Alemania el liderazgo mundial en más de catorce campos de la industria (automotriz, electrónica, programas de computadora, audio, video, miniaturización, partes aeronáuticas, partes aeroespaciales, industria ecológica, siderurgia especial, computación, robótica, control automático, óptica, piezas maquinadas, ensambles, etc.) y la lista, según todos los pronósticos, seguirá aumentando. No deja de sorprender este liderazgo para un país que carece de recursos pero no de talento. Por otro lado, contrasta esta situación con países como el nuestro, premiado por la naturaleza con una vastedad de recursos, pero con la falta de algunos ingredientes para igualar o superar el ejemplo de países exitosos. Ante la competitividad y la economía cada vez más globalizadas, la interacción entre mercados, consumidores y productos tiende a perder el sentido regionalista o nacionalista. Poco importa al consumidor si el producto proviene de algún país en particular, siempre que cumpla con sus requerimientos de calidad, precio y disponibilidad. En tales condiciones los productores locales son forzados a establecer procesos de mejora en sus costos, de tal suerte, que mal interpretados los indicadores de mercado pueden acabar con empresas enteras al despedir personal, mermar sueldos y prestaciones así como elevar los niveles de exigencia para mantener los presupuestos de gastos por debajo de lo esencial. Sin embargo, la fórmula que ha probado ser efectiva es precisamente lo contrario. No son los costos los que se deben disminuir con ardidés contables sino enfocar los esfuerzos y recursos de la empresa en mejoras radicales de las estrategias de diseño, manufactura y calidad para disminuir los costos de:

- Diseños inapropiados o poco confiables para cumplir con las expectativas del cliente.
- Materiales y componentes defectuosos no hábiles para el desempeño exigido.
- Procesos de manufactura deficientes e incapaces de cumplir con el requerimiento del cliente.
- Niveles de calidad pobres en la manufactura y altos índices de efectivo en campo.

- Baja confiabilidad en el desempeño de los productos al fallar antes de su vida promedio útil, (alta tasa de reposición de producto en campo) altos costos de garantía por fallas en diseño, manufactura, transportación o uso.

La competencia a escala mundial se vuelve cada vez más devastadora e impecable y bajo las circunstancias actuales se torna irremediamente agresiva, pero necesariamente inteligente. Este es el escenario para las empresas mexicanas.

Haciendo énfasis en las áreas vitales de una empresa y específicamente en diseño, manufactura y calidad el presente trabajo se enfoca a estas áreas, en especial a la manufactura y a los avances de los últimos cuarenta años en la materia. Se incluyen los sistemas avanzados de manufactura y sus características principales, en lo referente a los métodos matemáticos se presentan los análisis de problemas clásicos en la manufactura de ensamble. Cada uno de estos sistemas es de suficiente interés para dedicarle un trabajo de tesis completo. Se intenta también, estimular en los posibles lectores de post-grado la preparación de trabajos de profundidad y mayor alcance en el análisis matemático de la manufactura y la robótica. Finalmente se presentan casos de estudio de los sistemas avanzados de manufactura y las conclusiones generales de su aplicación.

En resumen, este trabajo de tesis está orientado a la descripción de sistemas avanzados de manufactura, a la evaluación de sus similitudes y diferencias, su concepción en el ambiente industrial, su tratamiento académico, presentar el uso del lenguaje matemático en la solución de problemas técnicos, así como la presentación de casos reales de aplicación con sus limitaciones derivadas de la práctica y un compendio de conclusiones referentes a la aplicación.

## **2.2 Procesos de Negocio**

Todos los procesos de negocio son consecuencia de la facilidad de fraccionar en partes reconocibles, administrables y con asignaciones de funciones, responsabilidades y autoridad la entidad de costo beneficio llamada empresa o compañía. En esta entidad no importa su naturaleza, giro o tipo de operaciones, existe un conjunto de procesos que comunes. Entre estos procesos podemos listar:

- Investigación de mercados
- Diseño de producto
- Investigación de competidores
- Encuestas e investigación de clientes

- Creación de bases de datos
- Selección de proveedores
- Publicidad y difusión de marca-producto-servicio
- Compra de materiales y materia prima
- Instrucciones de trabajo
- Selección de equipos, máquinas e instrumentos
- Producción
- Control de calidad
- Ingeniería del producto
- Ventas de producto
- Embarque de producto
- Almacenamiento de materiales
- Mantenimiento
- Innovación de productos-procesos
- Planeación de producción

Los procesos arriba citados representan un conjunto estratificable o agrupable en procesos de área significantes como: abastecimiento, mercadotecnia, ventas, logística, manufactura, diseño, ingeniería. Para el presente trabajo son de gran interés las áreas relativas al campo de diseño, manufactura y calidad. Apreciadas como funciones diferentes en las empresas o compañías su interdependencia e impacto, en el resultado final de la fabricación, obliga a considerarlas como un frente estratégico. En la literatura académica se consideran procesos de manufactura a toda actividad que cambie forma o propiedades a un material y agreguen valor a un componente o ensamble. Sin embargo, para efectos de la presente tesis, omitiremos el análisis de procesos y máquinas, concentrándonos en la descripción de los sistemas y estrategias integrales para efectuar dichos cambios.

### **2.3 Procesos de manufactura**

Desde el punto de vista histórico la manufactura es un proceso asociado a la necesidad del hombre por transformar los materiales para un uso específico o una necesidad detectada. El uso de sus manos para

fabricar los implementos requeridos inicia posiblemente con la obtención de pedernales al golpear dos rocas de obsidiana. A través del tiempo el uso de las manos para manufacturar implementos es abandonado para sustituirlas por máquinas. En los tiempos modernos el uso intensivo de máquinas y personal dio paso a una filosofía de mínima intervención humana. Los dispositivos electrónicos y mecánicos avanzados dieron la oportunidad de reducir el número de individuos a cargo de operaciones de manufactura. La creación de robots, dispositivos avanzados y programas de “inteligencia artificial” permitieron la sustitución del hombre donde parecía imposible.

Los robots ahora se utilizan en los procesos de manufactura para tareas repetitivas, tediosas, peligrosas o de alta precisión. La **tabla 2.3.1** es un esquema para presentar los cambios en la estructura e intereses de la manufactura a través del tiempo.

**Tabla 2.3.1** La manufactura a través del tiempo

<i>Tipo de manufactura</i>	<i>Recursos Humanos</i>	<i>Producción</i>	<i>Propósito</i>
Unitaria	Un individuo	Un producto-una pieza	Uso personal
Replicativa	Un individuo	Un producto-varias piezas	Uso personal
Repetitiva	Un individuo	Un producto-gran cantidad de piezas	Uso personal
Cooperativa	Varios individuos	Un producto-gran cantidad de piezas	Uso personal
Utilitaria	Varios individuos	Un producto-gran cantidad de piezas	Uso personal-trueque
Lucrativa	Gran cantidad de individuos	Un producto-gran cantidad de piezas	Venta a consumidor-usuario-cliente
Lucrativa-Masiva	Gran cantidad de individuos	Varios productos-gran escala de producción	Venta a consumidor-usuario-cliente
Lucrativa Selectiva	Gran cantidad de individuos	Variedad específica de producto-gran escala de producción	Venta a consumidor-usuario-cliente
Lucrativa Moderna	Pocos individuos uno o varios autómatas	Variedad de producto gran escala o lotes económicos	Venta a consumidor - usuario-cliente
Lucrativa Avanzada	Pocos individuos varios autómatas	Variedad de producto flexibilidad de cambios	Venta a consumidor-usuario-cliente
Lucrativa del Futuro ¿?	Pocos individuos gran cantidad de autómatas	Muy amplia variedad de producto, lotes económicos, lotes unitarios o únicos, lotes de gran escala, telemanufactura, manufactura simultánea de gran variedad y cantidad.	Uso personal Venta a consumidor-usuario-cliente

Existen procesos de manufactura de la más diversa índole como se muestra a continuación:

- Corte
- Punzonado
- Formado y troquelado
- Maquinado
- Moldeado
- Inyectado
- Ensamblado
- Pulido
- Templado
- Sinterizado
- Polidensado (multicapas)
- Conformado (embutido)
- Estampado
- Extruido
- Pintado
- Decapado
- Revestido

Algunos de los procesos listados arriba son procesos continuos y otros procesos de partes contables.

La variedad de procesos de manufactura es muy amplia y compleja, por esa razón nos limitaremos al análisis de un tipo especial de proceso conocido en el lenguaje de Ingeniería como proceso de manufactura de partes discretas.

#### **2.4 Procesos de soporte a la manufactura**

En el ambiente de manufactura se es proclive a diferenciar o separar actividades no relacionadas directamente con el proceso de fabricación por sí mismo. Tal es el caso, para ofrecer un ejemplo, de manufactura, calidad y diseño. Se conciben a menudo como tres procesos ajenos o de diferentes propósitos, siendo que deben considerarse campos de acción complementarios y mutuamente interdependientes. El diseño de un producto

y su manufactura definen su calidad, ciertos requerimientos de calidad a cumplir ineludiblemente definen el diseño y la manufactura de un producto. Es vital e importante atender sobremanera el concepto de triada de valor: diseño, manufactura y calidad. Existe una visión pobre, parcial o muy limitada cuando se consideran funciones independientes. De hecho, la manufactura depende también de otros procesos tan importantes como diseño o calidad y son de alto nivel de involucramiento con el piso de fábrica.

Algunos procesos son definitivos para seleccionar la tecnología y las estrategias de manufactura. Estos procesos son llamados de soporte y para una muestra tenemos el listado siguiente:

- Inteligencia de mercado (nuevos productos y tecnologías)
- Análisis de efectividad y tecnología de competidores ( participación de mercado)
- Análisis de tendencias del mercado (innovación)
- Investigación de preferencias del cliente (economías de escala)
- Financiamiento de inversiones a largo plazo (adquisición de tecnología)
- Convenios con socios tecnológicos (transferencia tecnológica)
- Análisis económico de centros de costo y utilidad (rentabilidad tecnológica)
- Ciclos de vida de los productos (vigencia tecnológica)

Los procesos de soporte no pueden ser menospreciados, porque de acuerdo al listado, varios de estos procesos se colocan con máxima prioridad en las agendas de reuniones de Gerentes, Directores y Vicepresidentes de las empresas, convirtiéndose en elementos de decisión para la selección del sistema avanzado de manufactura.

Una vez que los cuerpos gerenciales y directivos definen estos frentes de negocio o procesos claves, eligen el sistema avanzado de manufactura que cumpla con las condiciones determinadas en el estudio de viabilidad del proyecto. Por causas obvias, estas actividades y procesos se examinan previamente a la selección del sistema de manufactura. En una etapa posterior se detallan los procesos específicos de diseño y calidad.

Un escenario muy probable de encontrar en la industria o en los círculos académicos es la de diferenciar diseño y calidad de la manufactura. Sin embargo, el ejemplo más utilizado para demostrar lo contrario, es el éxito que ha tenido Japón al conceptualizar la manufactura como un solo campo, con especial énfasis en la formación de estructuras de trabajo con un solo equipo de tarea, consistente en ingenieros y operarios responsables del diseño, manufactura y calidad del producto. Con este esquema se aprovecha al máximo el conocimiento conjunto de la información colectada por el área de mercadotecnia.

Para la filosofía nipona, la calidad y confiabilidad de un producto se determina desde el diseño y es éste, el que debe definir los procesos de manufactura.

Debemos abandonar la visión estrecha y restringida de la manufactura para sustituirla por una de amplio espectro y alcance, considerando siempre el peso específico de todos los procesos que le dan soporte.

## **2.5 Clasificación de los procesos de manufactura**

Desde el punto de vista de la Ingeniería de Manufactura los procesos pueden dividirse según su tipo en continuos y discretos. Un proceso continuo se caracteriza por producir lotes en volumen o peso del material o sustancia llamada producto y a la cual se le evalúa o define un conjunto de variables de rango continuo. Estas variables son cantidades físicas o químicas como tiempo, peso, densidad, color, resistencia, conductividad, viscosidad, presión de vapor, volumen, elasticidad, transparencia, etc. Ejemplos de procesos continuos lo constituyen la producción de minerales, aceros, gases industriales, líquidos y espumas.

Por otra parte, un proceso discreto es aquel que produce piezas, componentes o ensambles en número claramente contable y poseen atributos los cuales permiten clasificarlos como productos con atributos aceptables o no aceptables según su especificación de calidad. Los atributos poseen escalas no continuas o generalmente escalas de conteo. Ejemplo de procesos discretos lo son: la producción de partes automotrices, la elaboración de partes plásticas, la fabricación de partes de acero maquinadas, la manufactura de microcircuitos electrónicos, etc. También los procesos discretos pueden producir partes o componentes contables con variables continuas para su clasificación de aceptación o rechazo al compararlas con una especificación. Ejemplos la producción de frutas o pies de cría con un peso determinado para su aprobación de acuerdo a una especificación.

En el presente trabajo se consideran solo sistemas avanzados de manufactura de partes discretas.

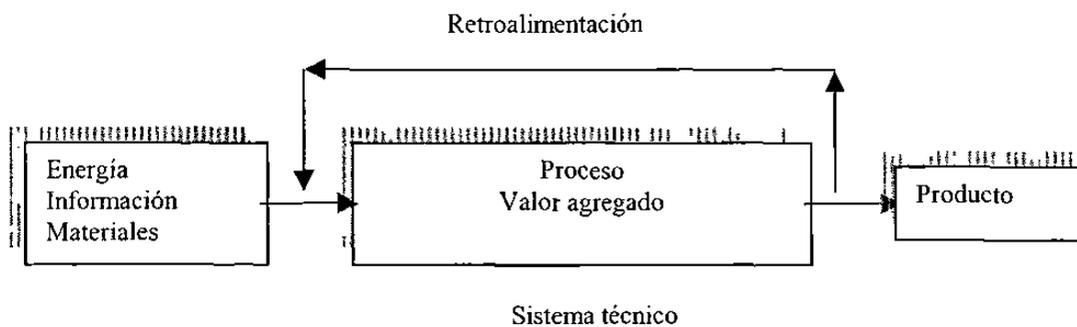
**CAPÍTULO 3**

**EL AMBIENTE DE MANUFACTURA**

### 3.1 Enfoque de sistemas

Un tratamiento especial de representación para análisis de los sistemas de manufactura consiste en conceptuarlo como un sistema. Esta representación fundamental de la Ingeniería, permite la esquematización teórica de una entidad con reglas de transformación, que actúan sobre los estímulos o entradas, para generar salidas o respuestas como se muestra en la **figura 3.1.1**.

**Figura 3.1.1** La manufactura como un sistema



En términos técnicos deben considerarse como entradas la energía, los materiales y la información. Las máquinas, equipos e instrumentos, herramental y dispositivos son los elementos y subsistemas que agregan valor mediante el cambio el cambio de forma o propiedad a las entradas. Las salidas son las entradas con valor agregado del sistema. Se requiere de un lazo de retroalimentación para los aspectos de control como se muestra en la **figura 3.1.1**.

#### Layout

El layout juega un papel importante en la distribución de máquinas, equipos, instrumentos, herramental, y aditamentos. Determina también el diseño distributivo de las estaciones de trabajo y estaciones de transferencia de materiales, partes y componentes desde su ingreso a la línea de manufactura, desde la materia prima hasta el producto terminado. Esta metodología de distribución de los recursos, sus acoples, tiempo y movimientos en los enlaces de diferentes estaciones de trabajo o manufactura, establece las áreas requeridas para la optimización de los procesos, en cuanto a tiempo y costo de los almacenes temporales, así como de la infraestructura de transportación y manejo de materiales. Este campo de estudio en rigor pertenece a la Ingeniería Industrial y por su amplitud en las técnicas del diseño de layout no se tratará en el presente trabajo.

### 3.2 Conceptos fundamentales

Sin lugar a dudas el eje central de un negocio, compañía o empresa lo constituyen los productos y servicios que ofrece al mercado. Existen un conjunto de indicadores clave de negocio y todos ellos ligados a la manufactura, teniendo cada uno de ellos definición y evaluación numérica, estos indicadores son:

- Costo
- Calidad
- Tiempo de ciclo.

Definiremos a continuación estos indicadores en un concepto más amplio.

- Costo total: Valor económico de gastos e inversiones requeridos para disponer al mercado y/o los clientes un producto manufacturado.
- Calidad total de producto: Nivel de calidad en el campo de uso del producto.
- Tiempo de ciclo total del producto: Tiempo transcurrido desde la etapa de diseño hasta la obsolescencia del producto en el campo de uso.

En cada uno de ellos puede considerarse el segmento relativo a la manufactura como veremos a continuación:

Costo total del producto
Costo de materiales + <b>costo de manufactura</b> + costo de logística + costo complementarios

Calidad total del producto
Calidad del diseño + <b>calidad de producto terminado</b> + calidad del producto en campo

Tiempo de ciclo total del producto
Tiempo de ciclo de diseño + <b>tiempo de ciclo de manufactura</b> + tiempo de ciclo de logística-vida útil...

Es claro que la segmentación realizada en los diagramas anteriores ofrece posibilidades de cuantificar el segmento de mayor contribución en el costo, calidad y tiempo de ciclo. Lo interesante de este esquema es su aplicación comparativa entre diferentes sistemas de manufactura, al evaluar lo más importante, que son sus

resultados. Los indicadores de costo se miden en dólares, la calidad en partes por millón y el tiempo generalmente en semanas o meses. Se entiende que el nivel de partes por millón tiene sentido para la producción de grandes volúmenes de partes o componentes. En caso contrario, cuando sólo se produce uno o varios ejemplares (lote mínimo) la medición de calidad se realiza con el indicador de defectos por unidad (DPU). Es decir, la suma de todos los defectos en un lote de tamaño  $n$ . Es propio resaltar que la triada de valor costo-calidad-tiempo de ciclo, se convierte en un marco de referencia crucial para comparar los sistemas de manufactura (Bhote, 19xx). De allí el valor de estos principios teóricos, que a través de conceptos operacionales se traducen en indicadores poderosos para evaluar el desempeño integral de la manufactura. Un tema tan importante como el descrito, es digno de trabajos serios y de largo alcance, especialmente por los futuros maestros en ciencias del área de ingeniería de manufactura.

### 3.3 Tipos de problemas de manufactura

Los problemas a los que se enfrentan los ingenieros de manufactura, diseño, calidad y confiabilidad son de una variedad y complejidad admirable. Ciertamente que los niveles de dificultad crecen, a medida que los requerimientos de control y automatización de las operaciones se vuelven más exigentes para minimizar o eliminar la participación humana. Pero también existen en el piso de planta, una colección de problemas ligados a escalas de producción, tiempos de ciclo, lograr costos efectivos, entregas a tiempo, etc. Un listado simple y básico de problemas a los que se enfrentan los ingenieros en el piso de planta lo podemos observar a continuación en la siguiente **Tabla 3.3.1**.

Es obvio que cada problema en manufactura tiene una solución distinta, pero podemos utilizar una metodología científica que sirva para analizar, sintetizar y resolver cualquier problema de manufactura, diseño y calidad.

Una práctica en la industria <sup>1</sup> es la secuencia que se muestra a continuación:

- Identificación del problema
- Evaluación de restricciones, condiciones y límites a satisfacer
- Prioridades en la solución del problema

Tabla 3.3.1 Tipos de problemas en la manufactura

TIPO DE PROBLEMAS	ÁREA OPERATIVA
Abastecimiento de materiales	Abastecimiento
Productividad	Manufactura
Calidad de diseño	Diseño
Confiabilidad de producto	Diseño/Ingeniería/Calidad
Costo por lote	Manufactura
Bajos volúmenes de producción	Manufactura/Ventas/Mercadotecnia
Flexibilidad en producción	Manufactura
Costo de materiales	Abastecimiento/Manufactura/Ingeniería
Transporte de materiales en proceso	Ingeniería /Manufactura
Repetitividad y Reproducibilidad de operaciones	Manufactura
Velocidad de máquinas	Manufactura/Ingeniería
Ciclo de tarea	Manufactura
Precisión de movimientos	Manufactura/Ingeniería
Sensado	Manufactura/Ingeniería
Programación de máquinas	Manufactura
Diseño de producto	Diseño/Ingeniería
Manufactura especializada	Manufactura
Multiproceso programable	Manufactura
Automatización Integral	Manufactura/Ingeniería
Control de calidad opto-electrónico	Manufactura/Ingeniería
Cambio de producto en línea	Manufactura
Calidad de salida en producto	Calidad
Demanda de materiales en línea	Manufactura
Inventarios temporales en piso	Manufactura
Simultaneidad de operaciones	Manufactura/Ingeniería
Precisión de ensamblajes	Manufactura
Fabricación de aditamentos de manufactura	Ingeniería/Manufactura
Empaque	Manufactura

- Soluciones potenciales
- Soluciones factibles
- Elección final de solución
- Estimación de indicadores claves

- Pruebas reales para verificación de estimadores
- Nivel de satisfacción y éxito en pruebas de muestras o prototipo
- Decisión final para iniciar a gran escala real

<sup>1</sup> Tomado de ©Vitro-Whirlpool IBP (Improved Business Processes, 1990), ©World Wide Excellence System, Whirlpool, Co. USA, 1990

### 3.4 Métodos de solución de problemas de manufactura

El grado de complejidad y el número de problemas de manufactura suele convertirse, en la mayoría de los casos, en un cuello de botella para el resto de las áreas operativas cuando no son resueltos en períodos razonables de tiempo, una vez detectados. Con la filosofía de resolver, sólo el problema detectado en el área, se genera un método de solución focalizado o restringido para los problemas que competen a la fabricación. La otra alternativa de solución del problema es atacarlo desde una perspectiva integral o visión total. Existe una marcada diferencia entre uno y otro método de solución. Quizá la diferencia entre la visión focal o integral sea el tipo de problemas que resuelven. Se estima conveniente focalizar soluciones cuando los problemas no rebasan el área de manufactura, no involucran a otras áreas y las consecuencias de errores cometidos por probar soluciones tienen un mínimo impacto en costo, tiempo de fabricación y uso intensivo del personal. Es decir, soluciones exitosas pueden ser el resultado de ensayo y error hasta lograr el éxito en la solución del problema. El caso de la visión integral del problema para determinar una solución es diferente. Aquí se estima una solución que involucre a todas las áreas de la empresa: Abastecimiento, Manufactura, Ingeniería, Diseño, Calidad y Logística. La elección de la solución al problema de manufactura debe ser la de mínimo riesgo y máximo éxito o solución óptima. Esto es un requisito indispensable, porque de ser equivocada la solución, se impactan indicadores de costo, participación de mercado, utilidades y viabilidad de la empresa. Es claro que en las organizaciones a menudo se forman equipos de trabajo para instrumentar soluciones exitosas que desaparezcan los problemas de manufactura, diseño, calidad y confiabilidad desde su raíz. Sin embargo, más allá del método empleado para resolver problemas, existen razones de mucho peso para conocer los recursos avanzados de manufactura. Con el conocimiento de los recursos avanzados de manufactura es posible construir propuestas para generar modelos de solución focalizados o de gran escala. Conocer a fondo los recursos tecnológicos, sus principios de operación, sus características, propiedades.

alcances y limitaciones nos llevan a tener un arsenal de posibilidades esperando ser utilizados en el piso de planta. Las combinaciones posibles de estos recursos tecnológicos no se han agotado aún para proporcionar un semillero de soluciones focalizadas o de visión integral. Se intenta presentar, aunque superficialmente, los recursos avanzados de manufactura en el siguiente tema tomando en cuenta que estos recursos tecnológicos son los ladrillos de construcción de los sistemas avanzados de manufactura.

**CAPITULO 4**

**RECURSOS AVANZADOS DE MANUFACTURA**

#### 4.1 Elementos básicos de los sistemas avanzados de manufactura

Los recursos avanzados de manufactura son los equipos, máquinas, instrumentos, sensores, computadoras, lenguajes de programación de alto nivel, programas de computadora, transportadores (de material, partes o componentes), unidades lógicas programables y robots. Todos estos dispositivos presentan un nivel superior de control que minimiza la intervención humana. **Es necesario hacer énfasis en el adjetivo avanzado, el cuál se refiere a los mecanismos de programación de alto nivel, capaces de cumplir con las secuencias operativas más complejas, sin requerir la intervención humana por periodos muy prolongados de manufactura.** El ambiente de fabricación ha podido acuñar una gran cantidad de acrónimos, por tal motivo, se explicará su significado sólo en la primera aparición y se usará el acrónimo en el resto de las menciones. A continuación se listan los recursos avanzados de manufactura con una breve descripción. En el capítulo número 7 se incluye una muestra gráfica.

#### **MAQUINAS DE CONTROL NUMERICO DIRECTO**

##### DNC Direct Numeric Control

Una de las máquinas precursoras de la manufactura moderna. En los inicios del control numérico estas unidades tuvieron cintas magnéticas o de papel para efectuar la programación de instrucciones mediante una computadora separada de la máquina. Estas cintas eran llevadas al piso de planta y cargadas en la máquina usando un lector de cinta residente en la máquina. En instalaciones con unidades de este tipo, se encuentra una computadora central y el operador puede descargar un programa de cinta particular en una máquina determinada, la información se procesa en tiempo real, es decir, a medida que la cinta se lee las instrucciones se ejecutan en la máquina de control numérico de tres ejes x-y-z. La industria aeroespacial ha utilizado por años esta configuración de manufactura llamado sistema DNC.

#### **CENTROS DE MAQUINADO HORIZONTAL-VERTICAL**

##### Machining Center- Centro de Maquinado

Es una máquina de proceso programable y es el equipo precursor de muchos de los avances como CAD/CAM (Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing). Diseño Asistido por Computadora y Manufactura

Asistida por Computadora y también, base de desarrollo de la automatización integral, es decir, con la mínima asistencia del personal operario en su ciclo de operación.

Normalmente estas máquinas requieren el uso de varias baterías de cabezales o cambiadores de herramientas.

Las unidades más sofisticadas poseen doble cabezal o carrete de herramientas (magazine), como sistema de continuidad o redundante. Lo anterior con el fin de realizar cambio inmediato de herramienta dañada sin detener la operación de la máquina y evitar los tiempos muertos y tiempo para cambio de cabezal.

### **LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN/PROGRAMAS**

Son las reglas de instrucciones generales que permiten traducir los requerimientos de función, tiempo y espacio de manufactura en códigos de máquina, que a su vez, envían comandos de ejecución a los dispositivos conectados a la computadora. Con los lenguajes, es posible diseñar programas de ejecución de operaciones de manufactura en una gran variedad de dispositivos, instrumentos, equipos, máquinas y robots conectados a la computadora, vía red local u otras opciones. La computadora es un recurso muy poderoso por sus características de programación y control así como su capacidad de medición y ejecución de operaciones a través de mecanismos o dispositivos. La computadora típica consta de una unidad CPU, monitor, teclado, impresora, programas y dispositivos periféricos.

### **SISTEMA DE TRANSPORTE DE MATERIAL**

Simple Conveyor, Deck Conveyor, Transfer Conveyor, Multipurpose/Module Conveyor

Transportador Simple, de Cubierta, de Estructura Elevada y Modular.

Este es el sistema insustituible en virtud de ser requerido en todas las operaciones de manufactura de sistemas modernos. En toda unidad productiva moderna existe al menos un transportador de materiales, partes o componentes. Los transportadores (conveyors) son utilizados para transportar partes y componentes entre las diferentes estaciones de trabajo o proceso en las líneas de manufactura. En algunos casos los transportadores se utilizan para distribuir producto a las estaciones de empaque.

Para el caso de grandes inversiones en bienes de capital, como la industria automotriz, el uso intensivo de transportadores más especializados tipo cubierta (Deck) o de estructura elevada (Transfer) son indispensables para la agilización del flujo de materiales, en el piso de planta.

Existen dos tipos especiales de conveyors con aplicaciones más versátiles y flexibles: el transportador multipropósito o modular, generalmente son unidades autónomas para desplazarse por el piso de planta. Se les conoce como unidades guiadas y toman los nombres de AGV (Automated Guided Vehicle-Vehículo Guiado de Transportación) y RGV (Rail Guided Vehicle-Vehículo Guiado por Rieles). El AGV se desplaza en dos direcciones horizontales en un plano similar al sistema de ejes X-Y.

### **ROBOTS, SISTEMAS DE VISIÓN E INTELIGENCIA ARTIFICIAL**

Los robots son dispositivos programables y versátiles cuando a estos se les incorpora un sistema de visión o reconocimiento de patrones, e integrado con programas de decisión de inteligencia artificial. La programación de un robot requiere de programación de alto nivel y algoritmos de ejecución similares a los del brazo y mano humanos. Se ha tratado de realizar una réplica mecánica de las articulaciones humanas. La computación le confiere al robot capacidades sorprendentes como de “aprender”, “ver” y “decidir” en virtud de los programas de lógica avanzada. En algunas aplicaciones los robots se utilizan para tareas peligrosas, repetitivas y tediosas o para tareas de riesgo excesivo. Otras aplicaciones de robots almacenan datos de su propio desempeño y las complementan con datos de control de calidad. En aplicaciones más sofisticadas se emplea un sistema experto o programa maestro para la programación de las tareas de robot.

### **INTERFASES DE COMUNICACIÓN**

Estos elementos electrónicos-computacionales son cruciales para los protocolos de comunicación entre los equipos, instrumentos, máquinas, dispositivos y robots. Su principal función es traducir los lenguajes de diferentes máquinas programables o de comandos computacionales a un lenguaje estándar o común, para ejecutar las tareas de manufactura sin problemas.

### **MECANOS MANIPULADORES Y ROBOT SCARA**

SCARA: Selective Compliance Arm for Robotic Assembly

Unidad de Tarea Selectiva para el Ensamble Robótico

Son unidades simples o sofisticadas para manipulación o trabajo altamente repetitivo de gran precisión. También se utilizan para montaje de partes pequeñas. Su uso es intensivo en la industria electrónica. Poseen características de desplazamiento y rapidez que disminuyen los costos de manufactura por la productividad y calidad asociada. Muchos de los trabajos de miniaturización son llevados a cabo por este tipo de unidades. Algunos mecanos, manipuladores o inclusive el robot tipo SCARA son “capacitados” por personal experto para realizar tareas en campos especializados como pintado, cortado, soldado, posición o ensamble de componentes. Los robots, mecanos y manipuladores son réplicas, hasta ahora, bastante limitadas del brazo y mano humanos.

### **ROBOT INDUSTRIAL**

Según la ISO (International Standards Organisation –Organización Internacional de Estándares) la definición de un robot industrial es:

Un manipulador multifunción reprogramable servo controlado automático con múltiples ejes, capaz de manejar materiales, partes, herramientas, o dispositivos especializados a través de operaciones programadas de variable para el desempeño de una variedad de tareas. La aplicación de los robots industriales se ha extendido en la última década en las empresas automotrices, de partes aeroespaciales, electrónica, farmacéutica, nuclear, química y de ensamble. Algunas tareas asignadas típicamente a los robots industriales son al igual que los mecanos o manipuladores pintado, corte, manipulación de componentes, transporte de partes a sitios específicos en el proceso de manufactura, selección de producto y ensamble. La diferencia entre manipuladores y robots es el mayor peso de manejo de los robots industriales, su intensiva operación continua, la ejecución de tareas mas sofisticadas (e.g. instalación de puertas y soldadura para costura de unión en una unidad automotriz, la verificación de calidad del maquinado, la instalación de adhesivos en partes pegables,etc).

### **CAD / CAM**

Computer Aided Design / Computer Aided Manufacturing (Diseño Asistido por Computadora/Manufactura Asistida por Computadora)

Recursos de Diseño y Manufactura los cuales usan programas de diseño de producto y programación, ejecución, sensado, y control de manufactura. Esta posibilidad de unir medios computacionales, electrónicos, ópticos, mecánicos, eléctricos es verdaderamente el inicio de la manufactura avanzada. La adición de robots, así como conveyors, centros de maquinado, sensores, máquinas automatizadas y redes de cómputo a estos recursos crea una infraestructura poderosa, versátil, ágil e integral para la fabricación.

### **INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN, REDES DE CÓMPUTO Y DISPOSITIVOS PERIFÉRICOS**

Un amplio catálogo de instrumentos de medición soportan el registro de variables en el proceso de manufactura. En la actualidad quizá sea el recurso mas abundante y se encuentran disponibles todo tipo de instrumentos con principios de funcionamiento en el campo mecánico, eléctrico, electrónico, neumático, hidráulico, magnético, de radiación, óptico, térmico y nuclear. Un tratamiento detallado de los instrumentos de medición, aunque muy ilustrativo, está fuera del alcance del presente trabajo. En lo referente a las redes de cómputo, se ha orientado la elección hacia las redes locales en virtud de facilitar el acceso a una base maestra de datos para consulta, modificación o registros y gráficas relativas a las variables mediante la interconexión y disponibilidad de la información en toda la red. Es posible lograr el mínimo uso del papel en el piso de planta con esta opción computacional. La captura de la información requiere ser veraz y oportuna para la toma de decisiones en tiempo real. Una base de datos maestra de tiempo real íntegra y confiable, permite eliminar o reducir al máximo las confusiones generadas por la comunicación escrita. Generalmente se conectan a la computadora una serie de dispositivos periféricos para control de calidad, detectores, cámaras fotográficas, grabadoras, graficadoras de monitor o gráficas impresas, etc.

### **SMD- SURFACE MOUNT DEVICE**

#### **Unidad de Montaje de Superficie**

Son equipos de ensamble con un mecano de manipulación y montaje de partes muy a menudo electrónico o micropartes de integración de ensamble (microchips, procesadores, estratos de sellado, conexiones de hilo de oro, etc.) Existe una gama de productos que requieren esta tecnología. La escena más probable en el piso de manufactura es encontrar un manipulador tipo SCARA en los equipos SMD. Los equipos SMD se caracterizan por sus altos volúmenes de producción y especialización de tareas.

## SENSORES

Similarmente a los instrumentos de medición de variables, los sensores son vitales para los lazos de control automático, operación de máquina y actuación de dispositivos de manufactura. Los sensores, son los ojos de alerta, que envían señales para el funcionamiento del sistema de control automático.

Ante un campo tan amplio como el de los sensores, mencionaremos un ejemplo ilustrativo.

### Microinterruptores

este tipo de sensor asegura un estado lógico en el sistema y se clasifican en

- Microinterruptor de prerecorrido
- Microinterruptor de diferencia
- Microinterruptor de sobrecorrido
- Microinterruptor de fuerza actuante.

## **CAPÍTULO 5**

### **CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS SISTEMAS AVANZADOS DE MANUFACTURA**

### 5.1 Tecnología de Grupo

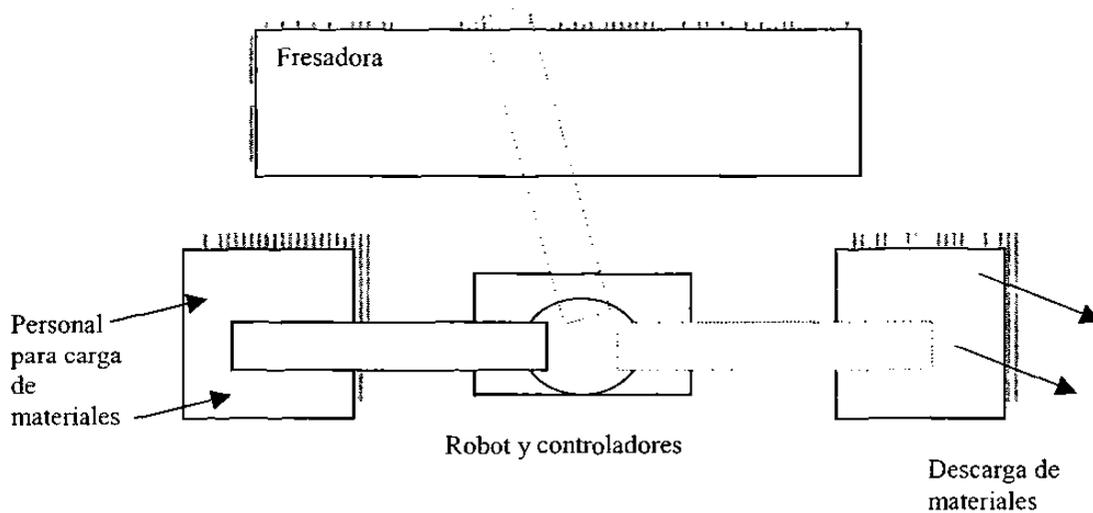
Entre los sistemas avanzados de manufactura, existe uno en particular, que describiremos por la importancia de sus características y aunque frecuentemente es considerado un sistema tradicional, inspiró a la creación de los que hoy en día se denominan Sistemas Avanzados de Manufactura. Tal es el caso de Tecnología de Grupo (también llamado Grupo Tecnológico), la configuración de este sistema, en el piso de planta, obedece a la agrupación de partes, productos o componentes, ensambles o sub-ensambles que poseen características de diseño muy similares y permiten crear celdas o grupos de máquinas, orientadas a producir la llamada familia de partes. Un ejemplo de grupo de partes es un grupo cilíndrico, el cual puede agrupar tipos de partes similares, como ejes de motores y discos de tracción por engranes. En este grupo de partes, la geometría de los componentes, permite agrupar en un mismo tipo de proceso líneas dedicadas al maquinado de piezas de metal. También pueden crearse grupos de partes basados en el procesamiento similar con el mismo conjunto de máquinas, siendo solamente diferente el uso de dispositivos especiales, herramientas y accesorios para cada número de parte, lo cual impacta reduciendo los costos, en virtud de las grandes escalas de producción y poca variedad de producto. En contraste con las líneas de transferencia tradicionales (líneas de producción) la versatilidad es una característica de la tecnología de grupo. Este tipo de celda de manufactura puede reconvertirse para fabricar diferentes tipos de partes agrupadas en familias de componentes con características semejantes. Las líneas de transferencia tradicionales sólo producen uno o varios productos, partes o componentes y no permiten grandes cambios en la naturaleza del producto debido a que el diseño de las líneas de transferencia está basado en economías de gran escala, es decir, en niveles de producción de cientos de miles o millones de piezas al año. Por otra parte, un cambio tecnológico suficientemente innovador podría volver obsoletas las líneas de producción clásicas y como veremos más adelante, todos los sistemas avanzados de manufactura llevan un riesgo inherente a su aplicación. Es importante señalar que la celda de manufactura de tecnología de grupo, está basada en diferentes arreglos de máquinas convencionales. Carece de automatización de lazo cerrado (retroalimentación) en la mayoría de los casos y la intervención humana es intensiva para el manejo y operación de los equipos. Un concepto alternativo en la tecnología de grupo consiste en considerar el producto significativo como la familia de partes. Por ejemplo, un fabricante de bombas hidráulicas puede decidir que su producto en sí mismo es la familia de partes o el grupo tecnológico, esto es, que el grupo tecnológico comprenda exclusivamente bombas hidráulicas en lugar de formar familias

de partes considerando grupos de ejes, grupos de álabes, grupos de corazas, etc. Otra característica relevante en la tecnología de grupo es que el manejo de materiales en el piso de planta se efectúa manualmente o con máquinas y dispositivos de transporte convencional. Sin embargo, este concepto de manufactura puede reducir los volúmenes de trabajo en espera y generalmente incrementa la eficiencia operativa de la manufactura de lotes pequeños mediante la reducción de costos por manejo y transporte de material, al reducir las grandes distancias de las líneas de transferencia clásicas, a recorridos cortos en la configuración de tecnología de grupo. Generalmente, la distribución de celdas de tecnología de grupo se construye con un arreglo de ellas, a menudo dispuestas en líneas de flujo, para evitar congestionamientos operativos. Cada celda es capaz de fabricar una pequeña variedad de partes similares y éstas, son manejadas entre máquinas, en forma manual. El control de tareas de máquinas son efectuadas por un operador.

## 5.2 Manufactura Celular Moderna

La manufactura celular moderna, es un refinamiento de los recursos para la fabricación en el piso de planta, muy similares a los conceptos de manufactura de celdas de tecnología de grupo. En la modalidad de manufactura celular moderna, se configuran una colección de máquinas mediante una distribución de proximidad para cooperar una con otra. La cooperación cercana puede incluir, por ejemplo, el compartir datos dimensionales entre una máquina de medición y una herramienta de máquina con unidad de control; o bien el compartir datos de posición espacial o el espacio de trabajo entre un robot industrial y una máquina de control numérico (torno, fresadora o taladro). Además de usar simultáneamente información, las máquinas se complementan una con otra en las tareas de manufactura. Más aún, esta cooperación, puede llegar a permitir trabajar en paralelo a cada máquina. Ejemplos de estos casos podríamos observarlos en una celda donde un robot industrial selecciona y ubica piezas sin maquiñar mientras la unidad de maquinado procesa piezas cargadas previamente. Una característica propia de la celda de manufactura moderna es el uso de computadoras para la supervisión de tareas y dicha computadora podría residir en una cualquiera de las máquinas de la celda. La **figura 5.2.1** muestra una celda de manufactura típica de robot central donde se puede observar las unidades componentes. Debe notarse que el proceso de carga y descarga se realiza manualmente, por lo que el robot debe tomar las piezas para ubicarlas en la máquina fresadora, un brazo

Figura 5.2.1 Celda Moderna de Manufactura



de manejo de herramienta realiza la selección, posicionamiento y cambio del herramental desde el almacén de herramientas (magazine); además existe un controlador de robot y un controlador del sistema de control numérico. La preparación de pallets (arreglos de piezas) también se realiza de forma semiautomática mediante un posicionador. Es preciso recordar que la tecnología de grupo genera el concepto de celda de manufactura coordinando hombre- máquina para la fabricación de una familia de partes: siendo ésta un conjunto de partes que requieren maquinaria, herramental, operaciones de máquina, dispositivos y moldes similares.

De aquí que la celda de manufactura moderna pueda contener computadoras, robots y máquinas de control numérico, pero el proceso de carga / descarga, transporte y almacenamiento se efectúa positivamente con la intervención directa del hombre. En un frente comparativo, la celda de manufactura moderna está más especializada en la fabricación de una familia de partes, muy reducida en número, mientras que la tecnología de grupo presenta una gama más amplia de fabricación de producto. Lo anterior se justifica, por el hecho de que la celda de manufactura moderna, tiene un arreglo de menor número de máquinas unitarias y de operaciones que la celda de tecnología de grupo. Algunos autores utilizan el concepto de estación de trabajo para referirse a la celda de manufactura. Un concepto útil es la autonomía, la cual se define como la mínima intervención humana en un periodo determinado de manufactura permitiendo la operación confiable y

económica del sistema. Para ambos tipos de celdas, los aspectos y rutinas de inspección del control de calidad, son todavía manejados mediante control de operador, en virtud de las grandes dificultades que presentan los procesos de detección, identificación, comparación, aceptación y rechazo automatizados o controlados por robot industrial. Una decisión habitual y que es práctica común es la utilización de gauges (medidores). Es importante tomar en cuenta el punto de vista de autores respetables en el campo de la manufactura, al considerar a las máquinas complejas: centros de maquinado, máquinas de corte CNC, máquinas de inserción electrónica programable, etc., como celdas de manufactura por sí mismas, al ser diseñadas para operar por largos períodos en forma autónoma. La aplicación de la manufactura celular típicamente abarca otras áreas de procesos como lo son: procesos en hoja de metal (sheet metal), maquinado de partes metálicas, procesos de soldadura, ensambles y procesos de acabado (pintado y recubrimientos).

### **5.3 Sistemas de Manufactura Flexible (Flexible Manufacturing System)**

Los mercados actuales se caracterizan por patrones de demandas inestables y cada vez más exigentes en términos de calidad, tiempos de entrega y variedad de productos y servicios. Ante las condiciones del entorno mundial las industrias buscan alternativas para mantener su posición competitiva en los mercados globales. La opción más viable, para ofrecer respuestas a las condiciones cambiantes, es la adaptación de los sistemas de manufactura en las empresas que buscan permanecer rentables en sus operaciones a largo plazo. La tendencia obligada para responder a los cambios constantes es la flexibilidad. Entendida como la capacidad de un sistema de manufactura de proveer productos en cantidad, variedad y calidad de acuerdo a la demanda.

Una característica fundamental de los sistemas de manufactura flexible es su capacidad de fabricar una amplia gama de productos en lotes de tamaño medio. Es justo un lugar intermedio entre las líneas de producción tradicional de gran escala de producción (lotes grandes) y las escalas menores de producción de las celdas de manufactura moderna (lotes pequeños). Los sistemas de manufactura flexible fueron creados para satisfacer las demandas de variedad de producto en lotes de tamaños medios. El primer sistema de manufactura flexible diseñado y construido en el mundo, poseedor del concepto innovador aunque sin los recursos avanzados, fue descrito por su diseñador-constructor D.T.N. Williamson como una línea de transferencia flexible en 1967. El sistema esencialmente consistió de siete máquinas de control numérico tipo “double spindle” (doble husillo) especialmente diseñadas para enlazarse mediante un transportador de pallets (arreglos de piezas en

plataformas). El sistema se basó en máquinas NC enlazadas por dispositivos de transferencia convencional y se aplicó a la fabricación de una familia de productos. más que a un sistema de manufactura flexible tipo “fully fledged”. En contraste, con el primer sistema de manufactura flexible de Williamson con unidades de control numérico, los recursos actuales como las máquinas programables de control numérico de computadora CNC (Computer Numeric Control), permiten mayor reconfigurabilidad de producto a producto mediante unidades herramientas, almacenes de partes, moldes, dispositivos o calibradores. Para el presente trabajo tanto sistema de manufactura flexible y sistema flexible de manufactura significarán lo mismo, debido a la traducción libre del texto en lengua inglesa y al uso coloquial que se da en trabajos de campo, usando ambos términos indiscriminadamente.

#### **Definición de sistema flexible de manufactura**

La diversidad de términos y conceptos relacionados con los sistemas flexibles de manufactura es muy extensa. Muchos de estos conceptos se utilizan en diversas disciplinas con distintos enfoques y significados lo que se puede prestar a ciertas confusiones. De hecho, un primer ejemplo lo constituye la propia definición del sistema de manufactura flexible como se exhibe a continuación:

- Un sistema flexible de manufactura consiste de un grupo de estaciones de trabajo interconectadas por medio de un sistema automatizado de manejo y almacenamiento de materiales, controlados por un sistema de computadora capaz de procesar simultáneamente diferentes tipos de partes. (Groover, 1987)
- Un sistema flexible de manufactura consiste en unidades de procesamiento avanzado (centros de maquinado, máquinas de giro, centros de fabricación integral, estaciones de trabajo, máquinas CNC, etc.,) equipados con sistemas automáticos para carga, descarga, transporte y almacenamiento así como un método de detección de condiciones de herramientas o equipo y unidades de reemplazo conduciendo todo el proceso de supervisión de la producción mediante el uso de computadoras. (T. Yamazaki, 1998)
- Un sistema flexible de manufactura consiste de un grupo de máquinas de producción programables integradas con equipo automatizado de manejo y almacenamiento de materiales, bajo la dirección de

un controlador central computarizado para producir simultáneamente varios tipos de partes con tasas de producción no uniformes. (Fischer, 1991)

Cada definición anterior muestra elementos de similitud y cada una de las definiciones aporta un concepto relevante de mención única. Esto es significativo por lo que toca a los autores Groover y Fischer en contraste con la visión muy particular del diseñador y constructor de sistemas flexibles de manufactura: Yamazaki. Es probable que la filiación profesional de los autores influya para destacar un elemento en particular en las definiciones.

### **Componentes de un sistema flexible de manufactura**

Un sistema flexible de manufactura se compone de tres elementos principales:

- Estaciones de trabajo

El proceso de manufactura determina el tipo de máquinas en cada estación de trabajo y las operaciones correspondientes. Las máquinas de tarea suelen ser centros de maquinado, máquinas herramientas de control numérico de computadora, dispositivos o mecanos para ensamble, equipo para inspección, etc.

- Sistema automatizado de manejo y almacenamiento de materiales.

Es el equipo utilizado para conducir los materiales a través de las estaciones de trabajo y finalmente al almacén de producto terminado.

- Sistema de control computarizado.

Este sistema se emplea para coordinar las actividades de las estaciones de trabajo (procesado) y el sistema de manejo y almacenamiento de materiales.

Es claro que además de los tres componentes anteriores todo sistema de manufactura flexible requiere de la intervención humana para funcionar. La programación del equipo automatizado en las estaciones de trabajo, la programación y operación del sistema de control computarizado, los preparativos necesarios para el inicio de operaciones, la alimentación de la materia prima dentro del sistema así como retirar las partes procesadas obviamente requieren de la participación humana. Existe una diferencia, que es necesario señalar, entre un sistema flexible de manufactura y una celda de manufactura. El término celda de manufactura se puede emplear en una forma muy amplia. Generalmente se emplea para referirse a un grupo de máquinas que procesan una familia de partes. Dichas máquinas pueden ser de operación manual o automatizada, o bien, una

combinación de ambas modalidades. La celda de manufactura puede contar con un sistema de manejo y almacenamiento de materiales, pero no llega a ser un requisito indispensable y podría en todo caso, controlarse con computadora o mediante control por operador. **La diferencia, entre sistema flexible de manufactura y celda de manufactura, la establece la condición obligatoria para el sistema flexible de manufactura de contar con un sistema de manejo y almacenamiento de materiales completamente automatizado, esto significa que el transporte de materiales entre las estaciones de trabajo, el proceso en las estaciones de trabajo y el control de supervisión, se llevan a cabo mediante computadora.**

### **Flexibilidad de un sistema de manufactura**

Es de notable interés clarificar el término flexible. Por obvias razones la primera definición natural sería ilustrar el término usando la definición del diccionario de la lengua española:

- **Flexibilidad-** disposición para ceder o acomodarse fácilmente al dictamen o resolución de otro.

Evidentemente nuestro interés se encuentra localizado en el campo técnico del vocablo flexibilidad y para aplicarlo a los sistemas flexibles de manufactura lo definiremos como sigue:

- **Flexibilidad-** grado de adaptación a cambios de operación o cambios de diseño de un sistema de manufactura y su capacidad para producir significativamente variedad y cantidad de productos.

Es práctica común distinguir entre dos tipos de flexibilidad de un sistema flexible de manufactura: flexibilidad de diseño y flexibilidad de operación. Para otros autores renombrados en la materia, existen dos conceptos fundamentales en los sistemas de manufactura los cuales se definen de la siguiente forma:

**Flexibilidad:** (algunas veces llamada flexibilidad de corto plazo). Se refiere a la habilidad de un sistema de manufactura para procesar un número diferente de partes de un grupo predefinido de partes. Por ejemplo, un sistema que puede fabricar 100 partes diferentes es más flexible que uno que sólo fabrica 20 partes diferentes.

Los sistemas de manufactura, aún los más programables son usualmente diseñados para producir un grupo predeterminado de partes. Dentro de la definición de flexibilidad, son posibles algunos refinamientos:

- **Flexibilidad de mezclas:** la habilidad del sistema para producir gran variedad de componentes y partes.

- **Flexibilidad de ruta:** capacidad de un sistema para permitir operaciones complejas de ruteado aleatorio y procesamiento simultáneo de partes.
- **Flexibilidad de volumen:** Eficiencia de un sistema para proveer los tipos de partes del universo de fabricación en las cantidades requeridas de cada una de las partes.

**Reconfigurabilidad:** (algunas veces llamada flexibilidad de largo plazo) se refiere a la habilidad de un sistema de manufactura para procesar un grupo de partes diferentes del universo original de diseño.

Esto puede implicar un número significativo de cambios o modificaciones en el proceso. Desde el punto de vista práctico es una medida de las facilidades o dificultades para modificar un sistema de máquinas y herramientas capaces de producir partes diferentes e inclusive nuevas familias de partes. Esta es quizá la característica deseable en los sistemas avanzados de manufactura, porque prolongan la efectividad del diseño y la rentabilidad de la inversión en los sistemas automatizados con recursos de robot industrial y control por computadora. Desafortunadamente no existen definiciones absolutas para comparar diseños de sistemas rivales y menos aún han sido definidos indicadores de efectividad o análisis comparativo (benchmarking). Existen varios factores que influyen en el diseño de los sistemas de manufactura flexible y muy especialmente afectan la flexibilidad y reconfigurabilidad del diseño, los factores a considerar según Gary W. Fischer (1991) son los siguientes:

- Volumen de producción
- Cambios de diseño esperados
- Tolerancias de partes y materiales requeridos
- Tipos y variedades de partes que serán producidos
- Operaciones de manufactura requeridas
- Vida del producto
- Fluctuaciones en programa de producción
- Capital disponible para inversión

El análisis y ponderación para cada factor depende de la importancia relativa otorgada en una situación en particular, por lo general cada empresa elabora sus estudios de campo usando diferentes metodologías. Un tema de esta naturaleza está fuera del alcance del presente trabajo.

### Tipos de sistemas de manufactura flexible

Los sistemas de manufactura flexible pueden clasificarse de acuerdo al flujo de las partes a fabricar a través del sistema. Existen tres tipos básicos:

- **Sistema de flujo secuencial:** este tipo se caracteriza porque todas las piezas a procesar tienen la misma secuencia o trayectoria a través del sistema. Todas las piezas procesadas pertenecen a una familia de partes bien definida; las diferencias geométricas entre las partes son menores y el diseño del producto se considera estable, lo que permite el uso de maquinaria especializada. Los sistemas de flujo secuencial tienden a responder mejor a cambios operativos que a cambios en el diseño del producto.
- **Sistema de estación única:** en este tipo de sistema las piezas permanecen en una sola estación, es decir, no se desplazan a través del sistema. Para poder procesar las piezas. La estación está equipada con gran variedad de herramientas. El sistema de estación única puede diseñarse para favorecer la flexibilidad del diseño, o bien, para facilitar la flexibilidad de operación.
- **Sistema de flujo aleatorio:** este sistema es el más apropiado cuando la familia de partes es muy grande, las piezas a procesar son completamente diferentes y las secuencias de operaciones necesarias para fabricarlas también es distinta. Este sistema generalmente está preparado para integrar nuevos diseños de partes, modificaciones a las partes del conjunto original de diseño, así como cambios en los niveles de producción para todas las mezclas posibles del conjunto de diseño original. Para poder adaptarse a todos estos requerimientos y variaciones este sistema de manufactura flexible de flujo aleatorio debe estar equipado con maquinaria versátil y en la mayoría de los casos con unidades redundantes. El grado de flexibilidad en este tipo de sistemas es mayor que en los sistemas de flujo secuencial, pero para balancear el flujo de partes a través del sistema provoca la sub-utilización del equipo o incrementa la inversión en unidades redundantes (máquinas similares) para evitar cuellos de botella en las operaciones de manufactura. Tipos de arquitectura de los sistemas de manufactura flexible La arquitectura de los sistemas de manufactura flexibles se divide en dos grandes grupos: arquitectura celular y arquitectura monolítica. Todos los sistemas actualmente operando se pueden clasificar dentro de las categorías siguientes:

### **Arquitectura Celular**

Esta configuración emplea uno o más robots industriales como sistema de manejo de materiales, básicamente la función que desempeñan es de carga y descarga de partes o maquinaria. Una restricción importante y que es necesaria considerar en el diseño, es el volumen de trabajo del robot, debido a que es esta característica la que define las distancias entre máquinas, almacenes temporales (magazines) y espacios de carga/descarga de los arreglos (pallets), así como el manejo de producto terminado. La configuración celular de robot central es la más utilizada y requiere poco espacio para operar. Usualmente esta celda se enfoca a procesos muy especializados o de baja complejidad, se utiliza frecuentemente con arreglos de centros de maquinado, fresadoras, tornos, taladros todos del tipo CNC, operaciones de ensamble, encapsulado o corte de precisión. Se han utilizado también para estaciones de trabajo de soldadura y pintado similares al de la **Figura 5.2.1**.

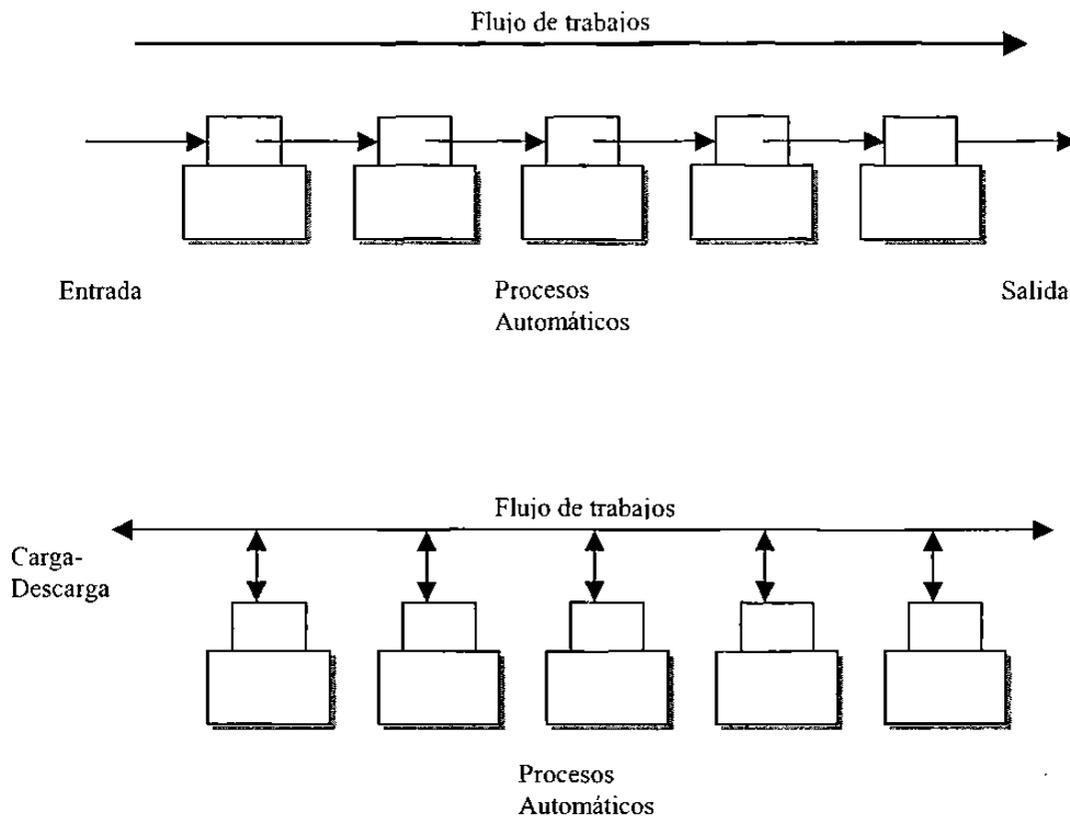
### **Arquitectura Monolítica**

Esta configuración de los sistemas de manufactura flexible posee cuatro tipos de arreglos:

#### **En línea**

Esta configuración es la más apropiada para sistemas de flujo secuencia, donde las piezas avanzan de una estación de trabajo a la siguiente en una secuencia bien definida. Su operación es muy similar a las líneas de transferencia (líneas de producción). En ocasiones se puede aumentar el grado de flexibilidad de este tipo de sistemas utilizando sistemas de manejo de materiales que faciliten el flujo de partes en ambos sentidos. Lo anterior se ilustra en la **Fig.5.3.1** donde se tienen sistemas de manejo secundarios en cada estación.

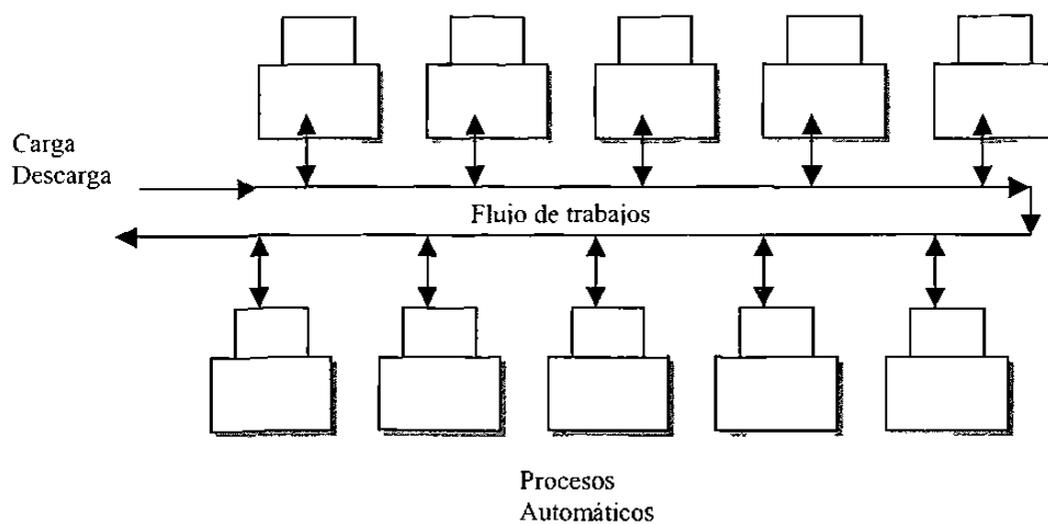
Figura 5.3.1 Configuración en línea de un FMS



### En ciclo

Esta configuración se muestra en la Figura 5.3.2. Generalmente las partes fluyen en una sola dirección alrededor del circuito (ciclo) y se pueden detener en cualquier estación de proceso. El sistema automatizado de carga y descarga de piezas se encuentra localizado en el extremo del ciclo de tal forma que las estaciones de procesamiento están ubicadas en los lados externos del ciclo. En cada estación es posible tener un sistema de manejo secundario para no obstruir el flujo de las partes alrededor del ciclo.

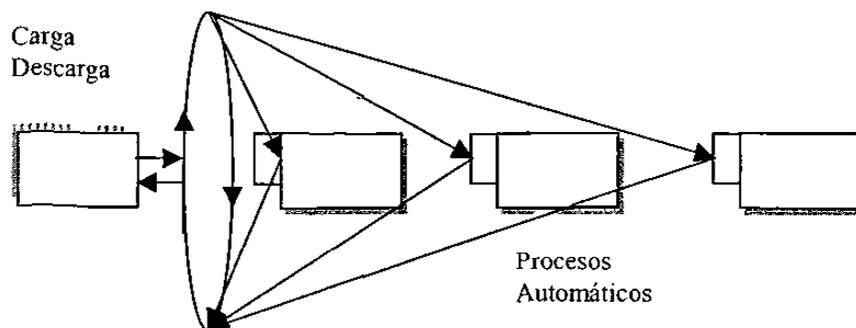
Figura 5.3.2 Configuración en ciclo de un FMS



### En escalera

La configuración tipo escalera es un refinamiento y adaptación de la configuración tipo ciclo. En la configuración tipo escalera se tienen anillos, lazos o circuitos sobre los que se localizan las estaciones de trabajo. Los anillos incrementan las opciones para moverse de una estación a otra, reduciendo la distancia promedio de viaje y por consecuencia reduciendo el tiempo de transferencia entre estaciones. En la **Figura 5.3.3** se muestra una configuración de este tipo.

Figura 5.3.3. Configuración en escalera de un FMS



### **De campo abierto**

Esta configuración también es una adaptación de la configuración tipo ciclo. Consiste de una combinación de ciclos, escaleras y apartaderos que se encuentran organizados para alcanzar los requerimientos de producción deseados. La configuración de campo abierto frecuentemente es la más adecuada para procesar familias grandes de partes. Se pueden tener varias máquinas del mismo tipo para permitir secuencias alternativas de procesado, dependiendo de la disponibilidad de las mismas.

### **Área de aplicación de los sistemas de manufactura flexible**

Para los sistemas de producción masiva las líneas de transferencia representan el método más eficiente y económico, sin embargo, estas tienen la limitante de no tolerar variaciones significativas en la configuración del producto. Un rediseño del producto puede convertir al sistema de producción en obsoleto. En contraste los sistemas de producción tipo taller se adaptan fácilmente a cambios en el diseño de las partes procesadas, pero tienen tasas de producción muy bajas. En términos de eficiencia de manufactura y productividad, existe un vacío entre las líneas de transferencia de producción masiva y los sistemas de producción tipo taller. Los sistemas de manufactura flexible (FMS) fueron creados como una alternativa de solución para ocupar el vacío entre los dos extremos. Utilizando tecnologías de automatización se puede tener la flexibilidad operativa de los sistemas tipo taller con los bajos costos asociados a los sistemas de producción masiva. Existen gráficos representativos de estos argumentos mostrando la ubicación central de los FMS en relación al volumen de producción y flexibilidad.

### **Control computarizado de un sistema de manufactura flexible (FMS)**

El control computarizado es un elemento clave para la flexibilidad de los FMS porque con pequeños cambios en el software se puede lograr que el sistema de manufactura produzca diferentes partes cada una con volúmenes diferentes de salida. Los sistemas de control computarizado que se utilizan en los FMS varían dependiendo de la complejidad del sistema y del grado de integración en la planta de manufactura, pero usualmente, todo sistema de control computarizado posee cierta estructura o niveles de control.

### **Niveles de control**

En un sistema de manufactura flexible completamente integrado se pueden identificar tres niveles de control:

1. Control computarizado del centro de trabajo
2. Control computarizado entre líneas de ensamble principal y sub-ensambles

### 3. Control computarizado supervisor

El control computarizado supervisor del FMS corresponde al nivel más alto de la jerarquía. En este nivel se analizan las demandas de los diferentes productos a fabricar, se diseñan los planes de producción y se analizan la factibilidad de fabricación, también se elaboran análisis de capacidad y el programa maestro de producción el cual es enviado gradualmente al siguiente nivel de control manteniendo comunicación permanente. En un FMS completamente integrado el control computarizado supervisor juega un papel fundamental en virtud de asistir a la mejor utilización del equipo impactando en la mejora de los costos de manufactura reduciéndolos para hacerlos competitivos.

El siguiente nivel en la jerarquía de control computarizado se localiza entre la línea de ensamble principal y los sub-ensambles, la computadora de este nivel recibe el programa de producción enviado desde el nivel supervisor y lo comunica a las diferentes computadoras de los centros de trabajo, asegurando su ejecución. Cuando el proceso de manufactura no es muy complejo, este nivel se puede omitir. El nivel inferior en la jerarquía de control computarizado de un sistema de manufactura flexible corresponde al control computarizado del centro de trabajo o control de operaciones del piso de manufactura. La computadora del centro de trabajo es la responsable de la ejecución de operaciones y fabricación física de las partes solicitadas. En la siguiente tabla se muestra un resumen de las funciones de control correspondientes a los tres niveles de la estructura jerárquica del control computarizado de un FMS.

#### **Sistema de control computarizado de un FMS-estructura jerárquica y funciones**

##### 1er. Nivel

- Planeación de la producción
- Simulación
- Programación maestra
- Análisis de capacidad
- Comunicación

##### 2do. Nivel

- Monitoreo del desempeño productivo
- Administración de bases de datos
- Calendarización de la producción

- Administración de los sistemas de alarmas

### 3er. Nivel

- Ejecución de la candelarización
- Control de recursos de producción
- Soporte de recursos programables
- Administración de herramientas
- Mantenimiento
- Manejo de materiales
- Control estadístico del proceso
- Comunicación
- Monitoreo y supervisión
- Administración de información

#### **5.4 Sistemas de Manufactura Esbelta (Lean Manufacturing)**

Por décadas ha sido tradición considerar la manufactura como una función independiente del resto de funciones del piso de planta. La falta de interacción positiva, visión integradora y de conjunto en los procesos de negocio ha marcado una frontera carente de sentido, entre procesos que desde cualquier marco conceptual o pragmático deberían en términos integrales, considerarse una sola función: Diseño, Manufactura y Calidad. Se han realizado esfuerzos por diversas compañías en el mundo para integrar visiones multifuncionales de la manufactura, diseño, calidad y productividad. Una respuesta la encontramos en lo que se ha denominado Sistemas de Manufactura Esbelta. El término Manufactura Esbelta comenzó a propagarse en Estados Unidos en 1990 a raíz de la publicación del libro "The machine that changed the world". Los autores de esta revolucionaria edición son James Womack , Daniel Jones y Daniel Roos quienes integraron en 1985 el Programa Internacional de Vehículos Motorizados auspiciado por el Instituto de Tecnología de Massachussets. Esta institución tenía como objetivo principal el efectuar una investigación exhaustiva de las mejores prácticas de manufactura en la Industria Automotriz alrededor del mundo para dar a conocer públicamente los resultados de sus trabajos. De esta forma el libro presentado por Womack, Jones y Roos es la recopilación y análisis finales de los datos e información colectados durante casi cinco años. Por vez

primera la academia norteamericana y la industria unían sus esfuerzos en una campaña de búsqueda, clasificación, análisis y generación de resultados para presentar un estudio comparativo (benchmarking) en las mejores compañías alrededor del mundo. Lo sorprendente del trabajo de estos autores es que todas las compañías participantes se mostraron abiertas para permitir el estudio de sus sistemas de manufactura esbelta. Algunas de estas plantas de manufactura se consideraban en la categoría de Clase Mundial. Esta primera publicación abrió el camino para nuevas publicaciones y seminarios acuñando el término esbelto del vocablo de la lengua inglesa “lean”. Este vocablo ha llamado la atención de quienes desean dirigir sus esfuerzos hacia una mejora continua en sus operaciones de manufactura y se ha convertido en una revolución mundial porque estos sistemas de manufactura esbelta prometen “aligerar y eliminar todo lo que genere desperdicio”. Existen compañías renombradas que han aplicado esta estrategia de manufactura en el piso de planta, entre las cuales se encuentran NUMMI, General Electric, Allied Signal, Chrysler en los Estados Unidos. A estas compañías se une una larga lista de empresas japonesas como Toyota, Sony, Mitsubishi, etc. Básicamente el enfoque de la metodología de la Manufactura Esbelta es la reducción de los tiempos de ciclo y la eliminación del desperdicio. Dichos conceptos diseñados por Shigeo Shingo y Taiichi Ohno en Toyota en 1970 han marcado la pauta en las nuevas configuraciones de plantas industriales. Shingo y Ohno consideran desperdicio cualquier actividad humana que absorbe recursos pero no crea valor, por ejemplo:

- Errores que requieren rectificación
- Producción de bienes que nadie demanda
- Producción masiva de bienes demandados pero en cantidades excedente que generan altos inventarios
- Actividades de procesos que se efectúan cuando no son necesarias
- Movimientos de empleados y bienes sin propósito alguno
- Inversiones no productivas
- Tiempos muertos en el proceso
- Altos tiempos de espera para procesar partes o productos a causa de fallas en el equipo
- Desbalance de líneas
- Tiempos de espera por materia prima sin abastecer
- Materia prima abastecida equivocadamente

- Bienes y servicios que no cumplen con las necesidades del cliente

El término japonés para representar el desperdicio es *muda* el cual fue utilizado por Taiichi Ohno durante su estancia en Toyota. La propuesta para combatir el desperdicio según los autores radica en el Pensamiento Esbelto motivo de la segunda publicación de Womack y Jones. Esta nueva manera de pensar provee una forma de especificar el valor, alinear las acciones de creación de valor en la mejor secuencia, conducir estas actividades sin interrupciones y desempeñarlas cada vez más efectivamente. En resumen se le denomina pensamiento esbelto porque provee un método de hacer “más con menos”, esto es, menor esfuerzo humano, menor equipo, menor tiempo, menor espacio, hasta que las operaciones se minimicen para igualar el proceso de mínimo costo y tiempo que permita fabricar lo que demandan los clientes.

Los Sistemas de Manufactura Esbelta han tenido impacto principalmente en tres grandes procesos:

- Desarrollo de nuevos productos
- Administración de órdenes de clientes
- Procesos de producción

Algunas técnicas que soportan la aplicación de la manufactura esbelta son las siguientes:

- Diseño para la manufactura
- Planeación avanzada de la calidad del producto
- Kanban
- Justo a tiempo
- Celdas de manufactura
- Poka Yoke (operación sin error)

Los autores Womack, Jones, y Roos establecen similitudes en todos los sistemas de manufactura esbelta, que de acuerdo a su investigación no existen dos sistemas de manufactura esbelta con las mismas técnicas de aplicación. Por otra parte, el análisis de las técnicas utilizadas por las compañías incluidas en el estudio permite agruparlas en factores significativos o más relevantes. Según los autores, el método general para el desarrollo e implementación de un sistema de manufactura esbelta consta de cinco principios, el uso de técnicas es tan variado que se requirió clasificar en cinco principios para simplificar los resultados los cuáles se listan y describen a continuación:

### **1. Definir Valor**

Es el punto de inicio crítico en un sistema esbelto. El valor solo puede ser definido por el cliente o usuario final del bien o servicio ofrecido y en términos de satisfacer sus necesidades a un precio y tiempo determinado. El valor es creado por el productor y desde el punto de vista del cliente esa es la única razón para existan las compañías proveedoras. Sin duda, el definir clara y acertadamente lo que significa valor para el cliente es una de las tareas más difíciles para las empresas, pero también se ha demostrado que las ventajas competitivas se logran al hacer esta tarea efectivamente. Proveer el bien o servicio incorrecto de la manera correcta es desperdicio puro.

### **2. Identificar la Cadena de Valor**

La cadena de valor es el conjunto de actividades específicas requeridas para llevar un producto a las tres tareas administrativas esenciales de cualquier negocio: la solución de problemas desde el concepto inicial, el diseño detallado, la ingeniería hasta la fabricación del producto; la administración de la información, desde la toma de órdenes del cliente hasta la programación detallada y la entrega ; y la transformación física, procediendo desde la materia prima hasta un producto terminado en la mano del cliente final. Después de efectuar un análisis a la cadena de valor se pueden detectar actividades que no crean valor pero son inevitables (desperdicio tipo I) y no crean valor y pueden ser eliminadas inmediatamente (desperdicio tipo II).

### **3. Definir el flujo**

Una vez que el valor ha sido definido, la cadena de valor para un producto específico ha sido identificada y consecuentemente las actividades que originan desperdicios han sido debidamente eliminadas, entonces es tiempo para hacer que las actividades restantes que crean valor fluyan ininterrumpidamente. Este principio trata de cambiar nuestros esquemas mentales de trabajo por funciones o departamentos hacia la conceptualización de procesos. La eliminación del desperdicio radica en hacer lotes pequeños de productos (idealmente de tamaño uno), que fluyan constantemente por procesos de producción. El efecto de esto es provocar que los tiempos de ciclo se acorten continuamente.

### **4. Jalar**

El primer efecto visible al convertir departamentos y lotes en proceso y flujo de productos, es que el tiempo requerido desde el concepto hasta el lanzamiento, de la venta a la entrega y de la materia prima al cliente final, se reduce drásticamente. Al tener un corto tiempo de ciclo y de respuesta, entonces es tiempo de

producir únicamente lo que el cliente demanda, haciendo que él mismo sea quien jale el gatillo de producción; en vez de continuar empujando partes y componentes y mantener grandes inventario, que representan desperdicio puro.

## 5. Perfección

Cuando una compañía ha comenzado a utilizar adecuadamente los principios anteriores, se provoca una avalancha de acciones para minimizar el desperdicio y continuar un proceso de reducción de desperdicio disminuyendo esfuerzos, tiempo, espacio, costo y errores; y que el producto que se ofrece es cada vez más cercano a las necesidades y expectativas reales del cliente. Al lograr estos objetivos en las operaciones se genera un ambiente propicio para la reducción continua del desperdicio como objetivo permanente de la compañía. Los sistemas de manufactura esbelta ofrecen a las organizaciones industriales una respuesta innovadora sobre cómo obtener mayor productividad y calidad bajo un esquema de trabajo.

### 5.5 Sistema de Manufactura de Clase Mundial – Seis Sigma (Six Sigma- World Class Manufacturing System)

En el tema anterior describimos características de la Manufactura Esbelta y que algunos autores denominan Manufactura de Clase Mundial creando confusión con otro sistema de manufactura con denominación similar. Para evitar un problema de semántica los creadores del sistema que describiremos en esta sección, lo denominaron Seis Sigma para indicar los fundamentos estadísticos matemáticos y de ingeniería que sustentan la metodología de aplicación. Es para todos conocidos que los japoneses acuñaron términos como Just in Time (Justo a Tiempo), kanban (tarjeta-demanda), kaizen (mejora) y muda (desperdicio) en sus sistemas de manufactura por demanda (pull system). Los aplicaron con el propósito de eliminar el desperdicio y efectuar mejoras en todas las actividades productivas. Fueron los norteamericanos los primeros en acuñar y ofrecer al mundo el concepto y práctica del **Sistema de Manufactura Clase Mundial Seis Sigma- SMCM (6 $\sigma$ )**. En Japón se desarrollaron iniciativas dirigidas a enlazar las funciones del diseño, a través de una disciplina llamada Quality Function Deployment (QFD, Despliegue de la Función de Calidad), las funciones de manufactura con Just in Time, Kanban y Diseño de Parámetros (Método Taguchi®) y finalmente la función de calidad mediante Diseño de Experimentos tipo Taguchi y gráficos de control así como las 7 Herramientas Básicas y las 7 Herramientas Avanzadas para la calidad. En los Estados Unidos de América surgió un

movimiento pro científico para utilizar el conocimiento de ingeniería con estadística matemática dirigido a integrar las funciones de diseño, manufactura y calidad. Con esta poderosa combinación y el talento de ingenieros, estadísticos, físicos y matemáticos el desempeño y resultados obtenidos, con esta visión de conocimientos complementarios, pudo crearse uno de los sistemas de manufactura más poderosos que el mundo ha conocido, y que hasta hoy, no ha podido ser superado. Pero como un evento anecdótico vale destacar que fueron los japoneses, a través de su pionero, **Dr. Genichi Taguchi** los primeros en aplicar las técnicas del diseño de experimentos para el diseño de parámetros (diseño de producto). El Dr. Taguchi desarrolló un método de aplicación del diseño de experimentos basado en “arreglos ortogonales”. Este método es una variante de los diseños clásicos creados por el fundador de los análisis de varianza y los diseños experimentales, el **Dr. Ronald Fisher** de la Gran Bretaña hace más de 80 años. Mientras que en los Estados Unidos de América no se conocía una aplicación en gran escala en su industria, excepto por un grupo muy avanzado de ingenieros, estadísticos y físicos matemáticos de la talla de **Dr. Walter Shewart, Dr. Armand Feigenbaun, Dr. Joseph Juran, Dr. Edwards W. Deming** y en los últimos 25 años: **Dr. George E. P. Box, Dr. Ronald Hunter, Dr. Donald B. Owen, Dr. Dorian Shainin** (conocido como el *solucionador maestro de problemas* por sus trabajos sorprendentes en las 600 compañías más importantes de los Estados Unidos) y **Dr. Keki Bhote**, el discípulo más brillante de Shainin y co-creador del Sistema de Manufactura de Clase Mundial Seis Sigma ( $6\sigma$ ). Los Dres. Shainin y Bhote son los responsables de la diseminación, en la industria norteamericana, de la aplicación del diseño de experimentos estadísticos enfocados al diseño y manufactura de producto, así como del SPC (Statistical Process Control: Control Estadístico de Procesos). El Dr. Bhote es un gran divulgador de los métodos inventados, desarrollados y mejorados por el Dr. Shainin. Es una fortuna, para los interesados en el tema, que el Dr. Bhote haya efectuado seminarios avanzados y publicado sus experiencias, así como los métodos generales de aplicación del SMCM ( $6\sigma$ ). También, que haya respetado las técnicas de Shainin Consultants, Inc.-por ser la propietaria de las marcas registradas de las técnicas más avanzadas, además de ser un acto de profundo respeto por la propiedad intelectual. El Dr. Bhote sólo da a conocer estas técnicas en sus seminarios avanzados. Hemos de considerar el papel pionero del Dr. Taguchi en la aplicación del Diseño de Experimentos (DOE) en la industria mundial. Por otro lado, el Dr. Box ha demostrado en sus trabajos de investigación en el Centro de Manufactura. Productividad y Calidad de la Universidad de Michigan el gran riesgo que corre, quien conduzca experimentos diseñados bajo los criterios

de los “Métodos Taguchi”, por sus baja eficiencia, el alto costo incurrido para la experimentación y lo más grave, el alto riesgo de obtener resultados erróneos comparados con los métodos clásicos. En contraparte, la alternativa más eficiente, económica, fácil y de rápida aplicación son los métodos creados y mejorados por el Dr. Shainin. El Dr. Bhole en la Universidad de Harvard y posteriormente en el Instituto de Tecnología de Illinois ha dado a conocer dichos métodos, así como su aplicación en la industria y específicamente en la compañía Motorola Corporation, donde fungió como Director de Grupo de Diseño, Manufactura, Calidad y Confiabilidad; llevándola con sus métodos a ser la empresa más exitosa del mundo en la aplicación de los principios del DOE y del SMCM (6 $\sigma$ ). Los resultados obtenidos en Motorola han asombrado al mundo y no se han podido igualar. Es importante notar que cientos de compañías japonesas conducen miles de diseños de experimentos tipo Taguchi (arreglos ortogonales) para el diseño y manufactura de producto. Sin embargo, de acuerdo a los argumentos y demostraciones de los expertos de alto nivel, los resultados, aún en los mejores casos, resultan ser muy pobres del 10 al 50 % de mejora comparados con los métodos de Shainin. Pero lo que es preciso reconocer, es el papel fundamental del diseño de experimentos estadísticos matemáticos en el diseño, manufactura y calidad de productos. Describiremos, aunque en forma breve y sintetizada (por las razones de propiedad intelectual antes mencionadas), algunas características, filosofía y técnicas del SMCM (6 $\sigma$ ).

#### **Descripción General de un SMCM (6 $\sigma$ ).**

En toda empresa, que fabrique productos o preste servicios al cliente, toman especial valor tres elementos fundamentales de éxito: costo, calidad y tiempo de ciclo. Estos elementos están fuertemente ligados a las funciones de diseño, manufactura, calidad y confiabilidad. El diseño de un producto requiere datos de especificación e información de uso funcional y necesariamente pruebas de desempeño. Es imperativo que el diseño de un producto pueda especificarse con variables o atributos medibles y con rangos de valores deseables. Para diseñar un producto, que cumpla con los requerimientos del cliente, es necesario profundizar en el uso o aplicación del producto o propósito del servicio. Se establece entonces, un diseño orientado a cumplir con las cualidades que el producto o servicio debe demostrar en el campo de uso o aplicación. Una vez que se cuenta con los datos e información necesaria para el diseño, éste debe apegarse a requerimientos de fabricación y uso como son:

- **Manufacturabilidad** - Calidad de un diseño de producto o servicio que permite fabricarlo en tiempos de ciclo económicamente rentables y con facilidad de fabricación a través de procesos, métodos de trabajo y materiales.
- **Calidad**- Conjunto de cualidades previamente especificadas que un producto o servicio debe cumplir y demostrar en su campo de uso.
- **Serviciabilidad/Mantenabilidad** - Características del diseño y manufactura que permiten desensamblar un producto para reparación efectiva y económica en su campo de uso.
- **Confiabilidad**- Calidad referida a la calidad y durabilidad demostradas en el tiempo de vida útil previamente especificado del producto.

El diseño de producto involucra pruebas y evaluaciones de desempeño. Se llevan a cabo a usando los resultados del DOE con el objeto de comprobar la combinación de las variables y los valores específicos, que aseguran un desempeño o funcionamiento efectivo del producto en cuestión con niveles de defectivo (cantidad de productos con defecto) extremadamente bajos y económicamente despreciables para efectos de rentabilidad. Como consecuencia inmediata, la detección de variables críticas para el desempeño permite abrir el rango de tolerancia para aquellas variables que no se consideran relevantes en las pruebas de desempeño; con esto se reduce el costo por control, inspección y manufactura del producto. Esta filosofía de diseño es aplicable a cualquier producto y al sistema de manufactura donde se fabricará

#### **Cp y Cpk como estimadores de variación y cumplimiento de especificaciones en una variable**

Existe otro método para comprobar el nivel de calidad del diseño y la manufactura de un producto. Dicho método utiliza un estimador estadístico para el parámetro Cpk. Este indicador, cuyo valor debe ser estimado, mide la capacidad real de un proceso de producir productos dentro de especificación. Un indicador similar, Cp, es utilizado para estimar el potencial de un proceso de producir una amplitud de variación igual o menor al de la especificación. Es decir,

$$C_p = \text{amplitud de la especificación} / \text{amplitud real del proceso} = s / p$$

$$\text{con } k = (D - X_m) / (s/2) \quad \text{ó} \quad (X_m - D) / (s/2),$$

seleccionando el término que convierta a k en positivo, de aquí que

$$C_{pk} = (1 - k) C_p, \text{ donde}$$

De acuerdo a las investigaciones realizadas por los expertos y autoridades en el campo del Control Estadístico de Calidad el Dr. Donald B. Owen, el Dr. Salvador A. Borrego y la Dra. Youn-Min Chou en la Universidad Metodista del Sur de Texas, la compañía Ford Motor Company decidía la compra o rechazo de los productos, partes y componentes de sus proveedores, en base a un valor mínimo de  $C_{pk} = 1.33$ . Con esto Ford Motor Company incurrió en errores sustanciales, desde el punto de vista estadístico, con el cálculo del indicador  $C_{pk}$ , provocando con ello pérdidas millonarias a la industria. En un artículo científico de los autores antes mencionados, se establecen las propiedades de variación del valor de  $C_{pk}$ , es decir  $C_{pk}$  es un parámetro con distribución estadística y debe calcularse con un estimador estadístico dependiendo del tamaño de muestra de la colección de datos. Inclusive el valor de  $C_{pk}$  es cambiante en un mismo proceso. Después de este artículo publicado en *Journal of Quality Technology* en julio de 1990 y de la Conferencia Magistral dictada por los autores en el Congreso de la Asociación Estadística Americana en agosto de 1989 en Washington, la compañía Ford Motor Company cambió sus políticas de compra adoptando el resultado de la investigación de Owen-Borrego-Chou. (Es muy grato consignar que, una autoridad mundial en el campo del Control Estadístico de Calidad, como lo es el Dr. Borrego, sea egresado de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de nuestra *Alma Mater* y Máxima Casa de Estudios, la Universidad Autónoma de Nuevo León).

Uno de los objetivos de la manufactura de clase mundial, en los últimos años, ha sido evolucionar de una producción “dentro de especificación” a otra que cumpla con apego a un valor objetivo para disminuir la variación. Esta iniciativa está explicada magistralmente en la **función de pérdida de Taguchi** (una función cuadrática heurística), la cuál postula que el porcentaje de costo en el que se incurre, cuando la producción se aleja del valor objetivo en cada parámetro del proceso o característica del producto, está en relación directa con el cuadrado de esa magnitud de desviación o alejamiento. Para la medición de la variación en la manufactura de producto se pueden utilizar cantidades estadísticas como el rango (**R**), la desviación estándar ( $\sigma$ ) o la varianza ( $\sigma^2$ ), pero el indicador  $C_{pk}$  ha sido mayormente utilizado, en virtud de evaluar el proceso integral de diseño, manufactura y calidad con un solo criterio unificador y con mayor precisión si se aplican las tablas de Owen-Borrego. El Teorema de Tchebycheff\*, de la Estadística Matemática, nos facilita crear una regla empírica del porcentaje de datos o volumen de información, tomando los intervalos con adición y sustracción de múltiplos de la desviación estándar ( $\sigma$ ) al valor medio ( $\mu$ , mas exactamente  $X_m$ ) de la distribución de datos, siempre que la distribución sea normal (en caso contrario, el uso de subgrupos y

tomando como valor representativo del subgrupo, al valor promedio, permite cumplir con esta condición). La tabla 5.5.2 muestra estos valores

Tabla 5.5.2 Intervalo de  $\sigma$  y sus defectos en ppm

Intervalo de producto aceptado	% aprox. datos en el intervalo	Max. Núm. Defectos en ppm
$\mu \pm 1\sigma$	69.1500	308,500
$\mu \pm 2\sigma$	85.7218	142,782
$\mu \pm 3\sigma$	93.3190	66,810
$\mu \pm 4\sigma$	99.3790	6,210
$\mu \pm 5\sigma$	99.9967	233
$\mu \pm 6\sigma$	99.9996	entre 3 y 4

**\*Teorema de Tchebysheff**

Dado un número  $k$  mayor o igual que 1 y un conjunto de  $n$  observaciones  $y_1, y_2, \dots, y_n$  por lo menos  $(1 - 1/k^2)$  de las observaciones se encuentran dentro de  $k$  desviaciones estándar de la media.

(El Teorema de Tchebysheff se aplica a cualquier conjunto de observaciones, muestra o población).

La información anterior es sumamente útil para la aplicación de cartas de control de procesos. Estas cartas de control fueron desarrolladas por el Dr. Walter Shewhart hace 74 años y, desde entonces, han sido utilizadas en la manufactura, en el control de calidad y en el diseño de producto. Al respecto, Box, Shainin y Bhote han dejado claro que las cartas de control fueron mal utilizadas y pésimamente aplicadas. Incluso se les consideró técnicas para solución de problemas, provocando pérdidas millonarias en la industria alrededor del mundo, a causa de que las cartas de control *no son técnicas para solución de problemas*. Los expertos citados han señalado claramente que “las cartas de control tienen como función principal mantener un proceso bajo control, una vez que la variación inherente ha sido reducida a través del diseño de experimentos estadísticos” (Bhote, 1991). Conforme expertos estadísticos fueron apareciendo en la escena de la industria, y abandonando su exclusivo territorio académico, los charlatanes fueron desplazados y con estos, se extinguió un tanto la farsa y del engaño que sufrieron los empresarios por mucho tiempo en una especie de “Síndrome de Ptolomeo”, (toda la gente por mucho tiempo creyendo una mentira: la solución de problemas de diseño, manufactura y calidad con cartas de control).

El Dr. Bhote ha sido contundente al apuntar que la mayoría de las especificaciones de producto son vagas, arbitrarias y equivocadas y que la especificación de procesos, es aún peor. Señala que esto es una

consecuencia de entender la diferencia entre vender y mercadear. Vender es un proceso de convencer al cliente para que compre lo que ofrecemos a cambio de un monto económico. Mercadear es investigar que demanda el mercado y después fabricarlo para satisfacer la necesidad del cliente (venta asegurada). También consigna el Dr. Bhot,e que el peor error que se puede cometer en la industria, es fabricar con alta calidad lo que el cliente *no necesita*. Por ello, es necesario utilizar técnicas para traducir la voz del cliente en especificaciones de producto efectivas y precisas. Hace 24 años los japoneses lanzaron un método llamado Quality Function Deployment (QFD), Despliegue de la Función de Calidad. A decir de los expertos es innecesariamente compleja. Existen técnicas mucho más eficientes, simples y menos costosas como:

- Investigación de valor
- Análisis competitivo multi-atributo
- Impacto de utilidad por estrategia de mercado
- Análisis de percepción del cliente.

Lamentablemente son poco conocidas y aún, mucho menos utilizadas en los Estados Unidos así como poco conocidas en el resto del mundo industrializado. De acuerdo a Shainin y Bhote existen otras razones para la especificación deficiente y pobre de productos y procesos entre las cuáles destacan:

- a) el ego de los ingenieros por crear diseños en el estado del arte con su nombre grabado en el producto
- b) el uso de límites y tolerancias de especificación, más bien que un enfoque a valores objetivo o valores centrales de diseño para los parámetros de producto o proceso
- c) mínimo o escaso uso de confiabilidad en fallas entre tiempos medios (MTBF: mean time between failures) o servicios entre tiempos medios (MTBF: mean time between assists) como una especificación.
- d) Falta de sistemas de prueba en la aplicación funcional del cliente, con un método de diseño de experimentos para identificar variables importantes e interactuantes.

Shainin y Bhote no sólo han señalado problemas, también han proporcionado guías de solución:

1. Usar un enfoque evolucionario, más bien que uno revolucionario para el diseño del producto/proceso, uno para el cuál no más de un cuarto del diseño sea cambiado en un

tiempo dado, lo que significa este argumento es que mejorar el producto en sus características críticas reduce el costo de diseñar uno nuevo.

2. Establecer valores objetivos y aplicar la función de pérdida de Taguchi.
3. Salvar y optimizar procesos viejos a través del Diseño de Experimentos, en lugar de desecharlos en favor del equipamiento nuevo e intensivo en capital, con su cascada de problemas.
4. Utilizar pruebas de campo extremo y de ambiente múltiple como la técnica más poderosa para reducir las variaciones del producto o proceso de confiabilidad.
5. Extender el Diseño de Experimentos para pruebas de campo en las condiciones de uso del producto, es decir, de su aplicación.

Aún asumiendo que las especificaciones de producto hayan sido optimizadas, como se mencionó en líneas anteriores, se presenta otra falla muy grave: la conversión inadecuada de especificación de producto en especificación de componentes. Las razones son:

1. Fascinación de los ingenieros por la tecnología.
2. Proclividad de los ingenieros hacia tolerancias estrechas e indiscriminadas.
3. Prácticas de Ingeniería consistente en reproducir especificaciones publicadas por los proveedores, sin justificación alguna o peor aún, sin tomar en cuenta el uso funcional, costo, vida útil, facilidad de ensamble y tiempo de ciclo del producto.
4. Uso de programas de computadora para determinar tolerancias de componentes. Esto sólo puede hacerse si la fórmula que gobierna la relación entre las variables dependientes (salidas) y las variables independientes (entrada) es conocida. En muchos diseños complejos, involucrando gran número de variables independientes es sumamente difícil desarrollar una fórmula. Esta es una gran debilidad en las pruebas de simulación de Monte Carlo. (Como menciona el Dr. Bhote en sus seminarios, "ni el genio de Albert Einstein podría desarrollar dicha fórmula").
5. Análisis y Diseño tipo <el peor de los casos> o <caso extremo> con una probabilidad de ocurrencia demasiado baja en la práctica real. Este es un costo adicional sin valor agregado.
6. Poco o nulo conocimiento de los efectos de interacción de primer, segundo o tercer orden (incluso de grados más altos) entre variables componentes aún y cuando exista una fórmula matemática

para la relación entre variables. **Los efectos de interacción, de cualquier orden, sólo se conocen mediante experimentación de ingeniería o experimentación científica con diseños de la estadística matemática.** Este es el más grave error en la mayoría de las investigaciones científicas que sólo varían un factor o variable a la vez. No proporcionan información de las interacciones entre las variables. El valor de esta información reside en su poder para optimizar un proceso, los parámetros de manufactura o del diseño y las características de calidad de un producto. La diferencia entre usar y no usar los resultados de interacción puede oscilar en ahorros de 500% o razones de 5:1 en términos de costo.

Todos estos excesos pueden ser evitados mediante la aplicación de experimentos diseñados estadísticamente que separan las variables importantes de aquellas que no lo son. El Dr. Shainin y el Dr. Bhole han sugerido el empleo de técnicas de la estadística matemática clásica para mejoras en el diseño, manufactura y calidad. Otra alternativa, muy superior en todos los aspectos a los métodos clásicos, son sus técnicas. Ellos son pioneros en la creación de 26 técnicas avanzadas cuya propietaria de las marcas registradas (Service Marks, SM) y de los Derechos Reservados (Copyright, ®) de lo que han llamado **Ingeniería Estadística**, es la compañía Shainin Consultants, Inc. de los Estados Unidos de América.

El diseño de experimentos es particularmente importante en dos áreas:

1. Para resolver **problemas crónicos** de diseño, manufactura, confiabilidad y calidad
2. En la etapa de diseño de productos y procesos.

De acuerdo a Shainin y Bhole, "...un problema crónico puede ser descrito como un problema de producto o de proceso con un nivel de defectos inaceptable, medible en términos de desperdicio en miles o millones de dólares acumulados y que ha desafiado las soluciones de ingeniería tradicional por un largo tiempo..."

En los Estados Unidos de América, según Shainin y Bhole el **90%** de las empresas tienen problemas crónicos incluyendo las 600 compañías más poderosas. **No aplican diseño de experimentos, no conocen ni los métodos clásicos y desconocen, que estas técnicas, pueden resolver casi todos sus problemas de diseño, manufactura y calidad y convertirlos en empresas de Clase Mundial.** Las técnicas de DOE son especialmente importantes en todos los nuevos diseños, de modo que los problemas de calidad en la manufactura pueden prevenirse antes que el método del apaga-fuegos (muy común en la industria mexicana) llegue a ser necesario. Existen tres técnicas metodológicas para el diseño de experimentos: Clásica, Taguchi y

Shainin. La metodología Clásica está basada en el trabajo pionero de *Sir* Ronald Fisher quién aplicó técnicas del diseño de experimentos al campo de la agricultura en 1930. Es difícil tener otro ejemplo donde haya gran número de variables involucradas e interacciones entre ellas como sucede en la agricultura. En los Estados Unidos el DOE ha sido extendido a los procesos químicos, pero más allá de estas disciplinas, ha permanecido en el dominio de la academia y de sus principales exponentes como Box, Hunter y Owen, por mencionar algunas luminarias, eminentes profesores y autoridades estadísticas. El Dr. Genichi Taguchi en Japón adoptó el método clásico al desarrollo de la técnica de “arreglos ortogonales”. Sin embargo, huelga decir que los métodos del Dr. Taguchi, no han sido totalmente aceptados en Japón, pero las compañías líderes los han adoptado. Una de estas compañías Nippon Denso conduce más de 2,500 experimentos Taguchi cada año, lo que según Bhote, supera la cifra de experimentos en todas las industrias en Estados Unidos de América. En ese país compañías como AT&T, Ford, Xerox, ITT, United Technologies y algunos proveedores de élite de Ford han aplicado el método de arreglos ortogonales con un éxito muy pobre y bastante marginal. La tercera alternativa de aplicación del DOE (Design of Experiments) es una colección de técnicas inventadas o perfeccionadas y enseñadas por el Dr. Dorian Shainin. Desafortunadamente, no sólo para los Estados Unidos de América, sino para el mundo entero, es una verdadera y trágica realidad que este **Sistema Shainin®** sólo sea conocido y manejado por un número muy reducido de académicos, investigadores y consultores del Massachusetts Institute of Technology. No han recibido la difusión que merecen sus poderosos, efectivos y sencillos métodos. En parte se le atribuye, al escaso conocimiento de la Estadística Matemática por parte de los ingenieros en los Estados Unidos, (para nuestro país, una referencia obligada). Las cifras son reveladoras, en el país considerado el más poderoso de la Tierra, sólo 15,000 científicos e ingenieros tienen conocimientos de la Estadística Matemática en niveles de Maestría y Doctorado; el 50% de ellos se dedica a la academia en las más prestigiadas Universidades e Institutos. El 30% se desempeña en centros de investigación y únicamente el 20% laboran en la industria, donde la gran mayoría de sus co-profesionales de ingeniería o colegas carecen de conocimiento básico de la estadística matemática. En Japón 30,000 ingenieros con capacitación en estadística matemática han sido preparados para aplicar los Métodos Taguchi, los cuáles se ha demostrado en trabajos de investigación matemática por expertos del campo, que estos métodos tienen debilidades estadísticas serias. Sin embargo, no todo es trágico. la loable y más importante aportación del Dr. Taguchi y reconocida por todas las luminarias de la estadística matemática, es haber desmitificado el

infranqueable mundo de los científicos, investigadores, estadísticos y profesores universitarios de matemáticas avanzadas. Este reconocimiento bien ganado es por llevar a los laboratorios de diseño y piso de producción de la industria, la técnica de diseño de experimentos estadísticos. Aunque sus métodos presentan debilidades desde el punto de vista estadístico, logró aplicarlos en un ambiente donde, como el Dr. Taguchi lo señaló, los ingenieros se sienten incómodos con conceptos como desviación estándar ( $\sigma$ ), valor medio ( $\mu$ ), varianza ( $\sigma^2$ ), análisis de varianza ( $\sigma^2a$ ,  $\sigma^2b$ ), pruebas F, razón señal/ruido (s/n), pruebas t, pruebas  $\chi^2$ , bondad de ajuste, correlación, análisis multivariable, superficies de respuesta, etc. Justo es decir, que cuando los ingenieros aprenden estas técnicas, son los mejores practicantes, en virtud de su vastísimo campo de experiencia entre la teoría y la práctica. Según los Dres. Box, Shainin y Bhote, los métodos Taguchi de arreglos ortogonales, son innecesariamente complicados porque la multiplicación de arreglos internos por el número de arreglos externos, eleva a cientos el número de experimentos. Esto lo hace costoso. Además, el método Taguchi viola un principio elemental de aplicación estadística relativo a la **aleatoriedad** de la experimentación. Aquel método selecciona factores o variables (son sinónimos en el diseño experimental) mediante un método llamado tormenta de ideas (brainstorming) y/o diagrama causa-efecto o de Ishikawa con cartas agregadas y sin ellas (métodos japoneses). Tales métodos son desmedidamente subjetivos (basados en la opinión o en la colección de observaciones, según sea el caso), introduciendo demasiadas variables y con alto desperdicio de tiempo y dinero, lo cuál resulta paradójico, en cuanto lo que se busca es la optimización en la identificación de variables críticas y no críticas en el diseño, manufactura y calidad de productos. Por contraste, el método Shainin detecta la familia de variables importantes o críticas a través de técnicas multivari. búsqueda de componentes y comparaciones de pares (una herramienta poderosa en análisis de falla) las cuáles reducen grandemente el número de experimentos requeridos. Otro problema con el método Taguchi es que no considera interacciones entre variables, a menos que, sobre las “bases” de ingeniería de cada persona, una interacción severa sea “sospechosa”. Lo anterior nos lleva a una contradicción, puesto que es precisamente lo que buscamos encontrar en un experimento: el efecto de contribución de las variables en la variación total y sus interacciones de primero, segundo, tercero o grados superiores. En el Método Taguchi se deja al arbitrio personal o al conocimiento de ingenieros y científicos el considerar las interacciones, y, como consignan Shainin y Bhote en el 99% de los casos, el conocimiento de ingenieros y científicos no es suficiente, para anticipar lo que ocurre, con las interacciones de factores o variables en los experimentos

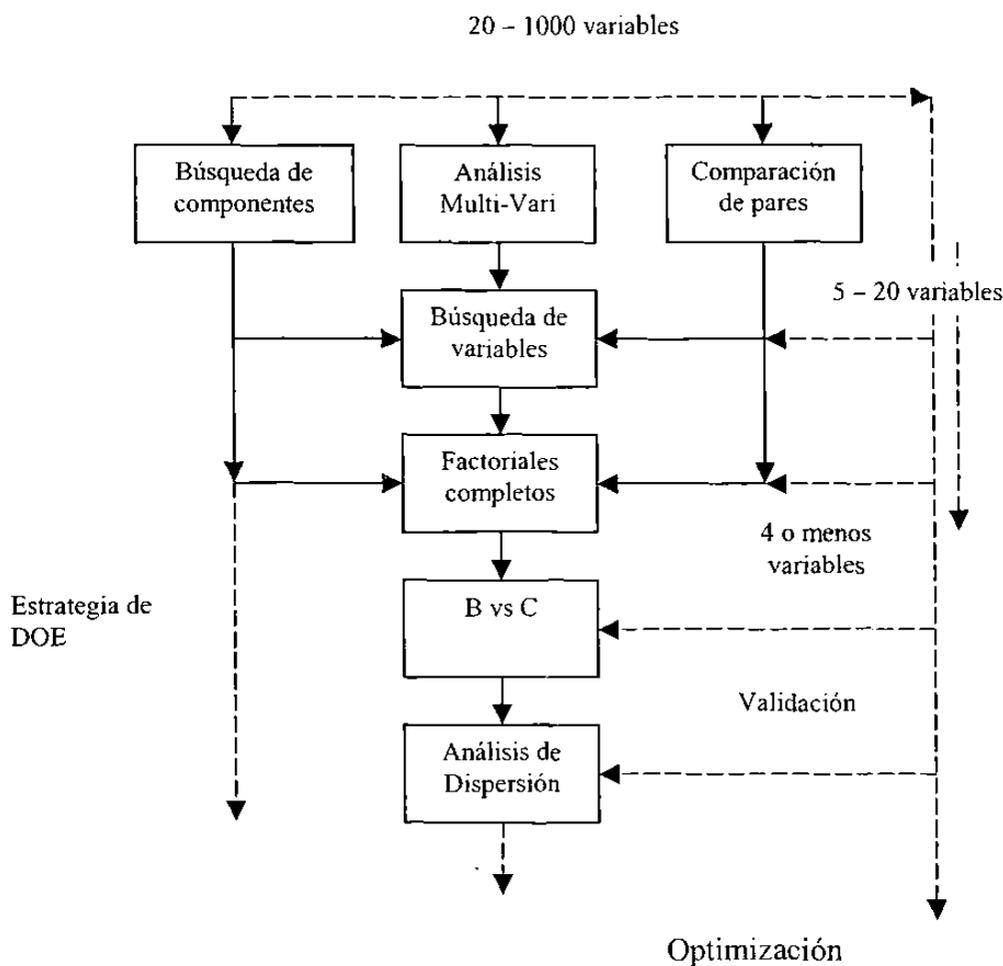
diseñados estadísticamente. Los arreglos ortogonales pertenecen a la familia de factoriales fraccionados y sufren de la misma debilidad estadística que la familia genérica de diseños saturados. La confusión de efectos de interacción (especialmente los efectos de interacción de orden superior) con los efectos principales. En resumen, sus resultados son sub-óptimos y los beneficios frecuentemente no son significativos o incluso espurios. El Sistema **Shainin®** nos proporciona técnicas para diagnosticar y reducir en gran escala la variación, consiguiendo superar por mucho al concepto y práctica del “Cero Defectos”, y aún, mucho más allá del Cpk ideal de 2.00. Las técnicas de Shainin son:

- **Simples**- entendidas por los ingenieros y los trabajadores de la línea. Las matemáticas involucradas son increíblemente elementales.
- **Lógicas**- basadas en el sentido común.
- **Prácticas**- fácil de aplicar en el diseño, producción y con los proveedores.
- **De gran alcance**- aplicable en un gran rango de industrias grandes y pequeñas, intensivas en proceso o intensivas en ensamble.
- **Estadísticamente poderosas**- en términos de precisión y exactitud, sin violaciones de principios estadísticos.
- **Excelente en término de resultados**- con ganancias en calidad, diseño y manufactura, no en el inconsecuente 10-50% sino en el rango de mejora total en costo, calidad y tiempo de ciclo de 10.000%.

La **Figura 5.5.1** representa una guía parcial del **Sistema Shainin®** para la reducción de variación. Consiste en 7 técnicas de Diseño de Experimentos (DOE) inventadas o perfeccionadas por Shainin y están basadas en su filosofía de que, la búsqueda de variables responsables de la variación en el diseño y manufactura, es similar a una investigación de detectives para encontrar culpables de un delito, con la aplicación del método científico, en ambos casos. Todo inicia con un trabajo de diagnóstico preliminar para detectar las variables que mayormente contribuyen a la variación de un proceso de diseño o manufactura, o bien, variación en las características de calidad de un producto. De acuerdo con la guía, las técnicas permiten detectar variables significantes hasta encontrar variables culpables (**Red X®**, **Pink X®** y **Pink Pale X®** en el lenguaje de Shainin) que contribuye a la mayor proporción de la variación total. Posteriormente, una vez capturadas o detectadas, se procede a reducirla y controlarlas. La variable o factor que contribuye con mayor proporción se

le conoce como **Red X®**, a la segunda causa de variación se le llama **Pink X®** y finalmente a la tercera causa de variación se le denomina **Pink Pale X®**. Por lo general estas tres variables son responsables del 80% de la variación permitida dentro de los límites de especificación del diseño, manufactura o calidad en cuestión.

Figura 5.5.1 Diagrama parcial de la estrategia para reducción de variación (Kekhi Bhote, 1991)



De hecho, un mínimo de  $Cpk = 5.0$  se logra no en 5 años, ni en 4, 3, 2 ó 1 año, no en meses como otras técnicas, sino justamente en uno, dos o tres experimentos estadísticamente diseñados. La metodología proporciona una guía de las siete técnicas del diseño de experimentos (DOE), sus objetivos, dónde y cuándo

son aplicables, asimismo proporciona un tamaño de muestra típico, revelando la poderosa e increíble economía de la experimentación estadístico-matemática.

El Sistema Shainin® comprende las técnicas avanzadas listadas a continuación:

*(Está fuera del alcance de esta tesis la descripción de cada técnica, aunque el autor del presente trabajo conoce a profundidad y ha efectuado aplicación práctica en su campo laboral de cada una de las técnicas, por ética profesional y respeto a la propiedad intelectual, sólo incluirá algunos comentarios sobre las siete técnicas elementales en virtud de requerir permiso escrito para la descripción completa, publicación y aplicación de las mismas por el propietario de las marcas registradas en los Estados Unidos de América.)*  
**Copyright ©1970 Service Marks (SM) de Shainin Consultant, Inc. –(Marcas Registradas).**

#### **Advanced Multi-vari®--Análisis y Gráficos Avanzados Multi-vari**

El propósito de esta técnica es reducir un gran número de causas posibles de variación a una familia mucho más pequeña de variables de diseño, manufactura o calidad que contengan a **Red X®**. Por ejemplo, reducir de 30 ó 100 variables a un número manejable de 1 ó 20. Identifica las causas de variación y su magnitud.

#### **Component Search®--Búsqueda de Componentes**

Es una técnica simple y poderosa para búsqueda de variables o factores causantes de la variación. Se aplica específicamente en operaciones de ensamble y operaciones orientadas a procesos o máquinas. Requiere al menos dos unidades, procesos o máquinas: unidad buena y unidad mala o defectuosa. El desempeño debe ser medible y repetible. Las unidades deben ser capaces de desensamblarse y reensamblarse sin que se presenten cambios significativos en la salida original de diseño.

#### **Paired Comparisons®—Comparaciones Pares**

Esta técnica es similar a búsqueda de componentes sólo que se aplica exclusivamente a unidades o componentes que no pueden ser desensamblados y re-ensamblados. Es una poderosa herramienta en el análisis de fallas. Deben tenerse unidades con características similares y poder distinguir una unidad buena de una defectuosa o mala. Se aplica en máquinas, estaciones de trabajo o instrumentos.

#### **Variable Search®—Búsqueda de Variables**

Una de las técnicas más poderosas jamás creadas, se le conoce como técnica binaria de eliminación o método matemático de la operación de diferencias promedios conjugadas y de proporción acotada. Se debe aplicar preferentemente en análisis de sistemas o modelos de más de 5 variables y no existe límite teórico, pero por consideraciones prácticas se recomienda limitarlo como máximo a 20 variables (suficientes para sistemas, modelos o procesos en el ambiente de diseño, manufactura, calidad y confiabilidad). La salida debe ser

medible en las variables y preferentemente se debe establecer al inicio la clasificación de lo aceptable y lo no aceptable. Es la piedra angular en la investigación de variables críticas de variación.

#### **Quick DOE®--Factoriales Completos con Promedios Rápidos**

Esta técnica identifica las variables detectadas como **Red X®**, **Pink X®** y **Pink Pale X®** y sus interacciones. Separa y cuantifica los efectos principales y de interacción de las variables importantes (por ejemplo, las encontradas en la técnica Búsqueda de Variables). Inicia el proceso de apertura de tolerancias en las variables no importantes. Es la herramienta perfecta de reducción de costo.

#### **B vs. C®--Mejor contra Normal**

Es una técnica que permite comparar dos entidades significativas como unidades o estaciones de trabajo, máquinas, procesos, productos, etc. La simbología proviene de Current Process (C) o Proceso normal y Better Process (B) o Proceso Mejorado. Se pretende comparar ambos procesos bajo la hipótesis que B es mejor que C. Esta herramienta utiliza la teoría estadística no-paramétrica, es universal en alcance para cualquier campo del conocimiento de ciencia, ingeniería, arte, humanidades, política, servicios sociales, ventas, relaciones humanas, mercadotecnia, estudios de opinión, etc. Técnica muy poderosa y de alta efectividad estadística.

#### **Quickcheck Scatter Plot Tolerance®--Graficación Analítica para verificación de Intervalo de Tolerancias**

Técnica que permite la graficación por dispersión de puntos, para calcular en forma rápida, tolerancias de diseño, manufactura, calidad y confiabilidad con datos proporcionados por otras técnicas de Shainin. Es posible calcular tolerancias correctas y realísticas así como valores de variables con perfil económico de manufactura.

El Sistema Shainin® comprende las técnicas de avanzadas listadas a continuación con su nombre de registro original en idioma inglés:

- **Attribute Search Patterns®**
- **B vs C®**
- **Barrier B vs C®**
- **Black Dot®**
- **Component Search Patterns®**
- **Delta Plot®**
- **Experience Plot®**

- **Isoplot®**
- **Isoplot Quickcheck®**
- **Multi-spec Search®**
- **Multiple B vs C®**
- **Operations Search Patterns®**
- **Overstress Probe Test®**
- **Paired Comparisons®**
- **Pale Pink X®**
- **Pink®**
- **Random Multi-spec Search®**
- **Randomized Sequencing®**
- **Rank Order Anova®**
- **Red X®**
- **Resistance Limit Transform®**
- **Shainin System®**
- **Source Isolation Squares®**
- **Tolerance Parallelogram®**
- **Variable Search Patterns®**
- **Visual Scoring Transform®**

**Copyright®1970 SM: Service Marks de Shainin Consultant, Inc.—(Marcas Registradas)**

El término Seis Sigma ( $6\sigma$ ), significa en datos prácticos, que en cada millón de productos manufacturados o servicios ofrecidos a los clientes, se produzcan 3 ó 4 unidades con defecto. El Sistema Shainin® es la base del Sistema de Manufactura de Clase Mundial- Seis Sigma y es un refinamiento de todos los métodos clásicos de Diseño de Experimentos. Los métodos avanzados de Shainin filtran toda la información disponible para obtener información de valor y clave para la detección, análisis, control, reducción y en algunos casos la eliminación significativa de la variación. Las técnicas de Shainin pueden definirse como universales porque son aplicables a todos los sistemas de manufactura y obtener resultados que ningún otro sistema de

manufactura ha podido lograr. Inclusive para mejorar procesos que se consideran viejos, imprácticos u obsoletos, rescatándolos para producir diseño, manufactura, calidad y confiabilidad de Clase Mundial; compitiendo y venciendo a las tecnologías más avanzadas y modernas que todavía no aplican las técnicas avanzadas de la Estadística-Matemática o las técnicas poderosas de Dorian Shainin.

### **5.6 Sistema de Manufactura Integrado por Computadora (Computer Integrated Manufacturing System)**

La manufactura integrada por computadora es un vocablo cada vez más importante en el mundo de los negocios y la industria. Desde su definición es posible advertir el concepto de “suma de partes”, o bien, un contraconcepto de lo individual y aislado. Esto quiere decir que la integración se refiere a un mecanismo rector y controlador de las partes componentes de un todo. Los inicios de este sistema de manufactura tienen lugar con la invención de la computadora orientadas a asistir a la función de diseño y a las funciones de manufactura.

El Sistema de Manufactura Integrado por Computadora (SMIC) tiene sus orígenes en las tecnologías CAD-CAM, así como en la combinación de bases de datos y los canales de comunicación electrónica. En una estructura de control de manufactura dominada por computadora se tienen tres grandes componentes igualmente importantes, a saber,

1. Control de máquina / proceso
2. Control de diseño y planeación
3. Control de producción y medición

El SMIC posee los tres componentes citados anteriormente, pero a diferencia de todos los demás sistemas de manufactura, es en el SMIC donde se presenta la mayor complejidad estructural de computadoras, información y canales de información para usuarios. En el SMIC se eleva al máximo posible el uso de los recursos avanzados de manufactura. La gran mayoría de los conceptos de control, de administración y toma de decisiones están incluidos en los tres puntos de la estructura de control de manufactura citada en líneas anteriores. Por ejemplo, en el control de máquina / proceso se puede incluir control numérico (NC), control numérico por computadora (CNC), sistemas de manufactura flexible (FMS), robótica o programación de grupo tecnológico. En el caso de control de diseño y planeación tratamos con sistemas de computadoras desarrollados para sistemas de colección de datos, planeación de procesos, sistemas automatizados de diseño,

sistemas para estándares de métodos y tiempos, etc. Para el caso de control de producción y medición se consideran la planeación de recursos de manufactura (MRP II: Manufacturing Resources Planning), justo a tiempo (Just in Time), sistemas de manejo de materiales, sistemas de información y sistemas de análisis de costos y finanzas.

Todas estas fases de la estructura de control son interdependientes y a la vez se soportan unas a otras. Es importante señalar, que algunos autores prominentes de literatura de ingeniería consideran como idénticos los términos <manufactura integrada por computadora> y <diseño asistido por computadora/manufactura asistida por computadora CAD-CAM>. Ellos mismos consideran que la barrera entre las funciones de diseño, manufactura, ingeniería y calidad debía romperse con un término que las integrara con las funciones de abastecimiento y logística. Dicho término fue acuñado años más tarde con la formalización de estas iniciativas como Sistema de Manufactura Integrada por Computadora (SMIC). Para todas las empresas de fabricación de niveles industriales es obvio que el componente mayor es lo que conocemos como el <Sistema de Manufactura>, el cual consiste en siete etapas integradas y listadas a continuación:

1. Obtención de la especificación del producto.
2. Diseño de un método para la fabricación del producto, incluyendo diseño y compra de equipos y unidades de proceso de fabricación.
3. Programación de la producción.
4. Compra de materia prima de acuerdo al programa de fabricación.
5. Fabricación del producto.
6. Medición y control de producción para cumplimiento de especificaciones.
7. Embarque del producto terminado al cliente.

Uno de los grandes fundamentos del SMIC es la creación, captura, uso y comunicación de bases de datos compartidas. Tiene, desde luego, una gran ventaja y lo podemos aplicar en el sistema de manufactura para lograr efectividad, por ejemplo, en las etapas 1 y 2. Es claro que la utilización de la misma base de datos, para ingeniería de diseño, e ingeniería de manufactura reduce el tiempo de ciclo total, además si se compara con el método tradicional de comunicación escrita, limitado e impreciso se reduce la posibilidad de errores en virtud de manejar la misma información en ambas funciones. Más adelante evaluaremos la necesidad de un lenguaje

preciso para lograr efectividad en la comunicación (en el tema de tecnología de grupo y su aportación al SMIC).

Para efectos de clarificación describiremos brevemente cada una de las etapas del sistema de manufactura con un escenario tradicional en contraste con uno tipo SMIC.

### **1. Obtención de la especificación del producto.**

Esta es la etapa del diseño realizado por la empresa o suministrado por el proveedor. Algunas ocasiones es una combinación de ambos. Aquí el diseño es efectuado con datos de especificación para que los ingenieros de manufactura interpreten y entiendan estas instrucciones para convertirlas en procesos de manufactura. Las geometrías (formas y arreglos) y los materiales son definidos así como el análisis de funcionamiento para asegurar que el producto cumple con el propósito de aplicación del usuario o cliente.

Escenario tradicional: cálculos de ingeniería realizados exclusivamente en el departamento de ingeniería de diseño; creación de documentos, dibujos e instrucciones; almacenamiento de la información; no existe un enlace formal entre generadores y receptores de la información. Escenario SMIC: Se genera una base de datos compartida para diseñar el producto con la participación directa de los ingenieros de manufactura y resolver problemas de diseño y manufactura en una visión integral del producto.

### **2. Diseño de un método para la fabricación del producto, incluyendo diseño y compra de equipos y unidades de proceso de fabricación.**

Esta es la etapa clásica de la ingeniería de manufactura donde los ingenieros definen planes, métodos y procedimientos de manufactura. Se contemplan las necesidades de materiales y su secuencia de uso y también se toman decisiones sobre la adquisición de nuevos equipos y procesos. Escenario tradicional: los ingenieros de manufactura actúan sin consultar a los ingenieros de diseño; los ingenieros de manufactura asumen que el producto ha sido definido adecuadamente. Determinan procedimientos de fabricación, aparecen problemas de desempeño del producto y su impacto en las ganancias de la compañía. Escenario SMIC: existe comunicación permanente entre todas las funciones de la compañía y en especial entre diseño y manufactura, mucho del trabajo de diseño incluye procedimientos de fabricación y nuevos equipos y procesos más eficientes, los ingenieros de manufactura analizan disminuir los tiempos de ciclo de fabricación con los sistemas de manejo de materiales, uso de una macro-base de datos para manejo de la misma información para los ingenieros de diseño y manufactura.

### 3. Programación de la producción.

Esta es la etapa de planeación y asignación de tiempos de máquina, productos a elaborar y cálculo de los tiempos de ciclo reales, esto es, considerando el cambio de herramental o el volumen de fabricación en las estaciones de trabajo y los tiempos de manejo y almacenamiento de materiales durante todo el proceso de fabricación de un producto en particular y repitiéndose para cada producto en el programa.

Escenario tradicional: oficinas decoradas con gráficos de todo tipo para estimar tiempos y movimientos cada fin de mes, programadores intentando construir un programa que no afecte niveles de producción (ensayo y error), la cantidad de documentos es enorme y el tiempo de cómputo regularmente es subutilizado a causa de los cálculos aritméticos manuales. Escenario SMIC: los tiempos y movimientos de ingeniería de manufactura, cambios de equipo, mantenimiento y manejo de materiales es producto de un esmerado cálculo mediante un modelo matemático de estimación usando las bases de datos de tiempos y movimientos históricos mensuales, se utiliza un programa computacional para determinar un programa preliminar teórico y comunicado a todas las áreas de negocio para su ligera modificación o aceptación. Se utilizan las bases de datos de acceso único a usuarios autorizados.

### 4. Compra de materia prima de acuerdo al programa de fabricación.

La función de los gerentes de materiales o compras es obtener los materiales al mejor precio posible con los niveles de calidad requeridos y en los volúmenes programados.

Escenario tradicional: los agentes de compra trabajan con el programa preliminar, los requerimientos de materiales, dibujos y especificaciones técnicas sin ayuda de personal especializado para decidir cambios o pruebas de ingeniería en los materiales, se sacrifican calidad y tiempos de entrega cuando se obtienen descuentos significativos por uso alternativo de materiales, el comprador desea hacer un buen trabajo comprando a mejores precios, persiste la práctica de mantener inventarios muy altos en el almacén para urgencias y cambios de programa. Escenario SMIC: la compañía a través de sus ingenieros establece el programa de adquisiciones y los proveedores aprobados para cada material o parte componente, electrónicamente se permite al proveedor disponer de la base de datos de compra para que programe las entregas al departamento de compras basado en los requerimientos de fabricación, el sistema electrónico y las bases de datos permiten acceder al proveedor información fidedigna de tiempos de entrega con fecha específica para minimizar el inventario en planta. el uso de MRP II y JIT se conjugan a la perfección para

complementarse (como veremos posteriormente) estableciendo cantidad, calidad, precio y tiempo de entrega en el programa maestro de producción.

### **5. Fabricación del producto.**

En esta etapa encontramos las típicas funciones de suministro y manejo de materiales a las líneas de producción, asignación de personal a las diferentes estaciones de trabajo u operaciones. Aquí es el dominio de los jefes, supervisores y la fuerza de trabajo.

Escenario tradicional: el jefe o supervisor recibe el programa de producción e inicia la fabricación algunas veces con material incompleto o equipo en reparación, los programas rara vez se cumplen a causa de los atrasos en el material, tiempos muertos y mal funcionamiento o daños en el equipo; estos eventos no esperados obligan a negociar nuevos tiempos de entrega o prórrogas incurriendo en mayores costos que aquellos programados y como consecuencia disminución en el margen de utilidad del producto en cuestión. Escenario SMIC: la programación de cada estación de trabajo es realizada por computadora y utiliza bases de datos de tiempo real mediante terminales interactivas, todos los requerimientos de próxima corrida de producción son completados casi al terminar la primera corrida de fabricación o lote de primer producto en programa evitándose tiempos muertos, embotellamientos de almacenes temporales e inventarios en tránsito; los pagos de sueldo al personal están ligados al tiempo de trabajo con información de tiempo real; los datos de mantenimiento permiten conocer la disponibilidad de máquinas y los requerimientos previos para su continua operación ; los jefes y supervisores dejan de ser verificadores de status (ahora lo realiza la computadora) y se convierten en gerentes que analizan la información y los resultados y proceden a realizar la planeación de mejoras. Esto es uso creativo del talento de todos los empleados.

### **6. Medición y control de producción para cumplimiento de especificaciones.**

Esta es la fase de control de calidad y costo financiero para fabricar el producto permitiendo comparar el desempeño real versus el desempeño planeado. Se detectan problemas aplicándose acciones correctivas y calculando el impacto en costo y funcionalidad del producto. Escenario tradicional: el personal de control de calidad y el personal d costo realizan sus trabajo en forma independiente; control de calidad reporta producto defectuoso y acciones correctivas realizadas incurriendo en el uso de mayor número de personal y horas laboradas, control de costos y finanzas sólo agregan el costo adicional de labores al costo de

producción del lote de producto o con cargo al turno de labores en cuestión, los análisis de costo y calidad se realizan a diario, semanal o mensualmente. Escenario SMIC: el personal de calidad y de control de costo así como finanzas tienen acceso a la misma base de datos con posibilidades de interactuar con la información, pueden adicionar comentarios y obtener mediante un programa de computadora análisis de calidad y costo incurrido estimando costos fuera del plan original de producción e integrando la causa conocida en virtud de que el personal de control de calidad accesa la información de defectos de producción; se tiene respuesta en tiempo real a los problemas de calidad y costo a través de la red computacional y a sus bases de datos únicas y compartidas, se realizan análisis de tiempo real para prevención de defectos.

#### **7. Embarque del producto terminado al cliente.**

Esta es la función de logística y materiales donde se empaqueta, almacena, embarca y envía el producto final hacia el cliente o consumidor. Escenario tradicional: la información de embarque se captura en computadora, se imprime y se circula al área de ventas para su tratamiento y facturación, frecuentemente los errores son causa de refacturación o quejas del cliente por cambio en los precios del producto o equivocaciones en el embarque del tipo de producto requerido por el cliente; los ciclos de embarque son tortuosos debido a que el personal permanece gran parte del tiempo inactivo las primeras semanas del mes y la última semana con gran actividad recurriendo a tiempo extra e impactando el proceso de ventas al disminuir los volúmenes de entrega por sobrantes o faltantes en las cantidades de producto por entregar a los clientes, de acuerdo al plan de ventas; se pone en riesgo el monto de facturación planeado y por otro lado la liquidez al incumplir con los pedidos del cliente facturando hasta completar el pedido original. Escenario SMIC: con una metodología de bases de datos compartidas y de fácil acceso el cliente puede modificar los pedidos de acuerdo a fechas límite accedendo la información mediante la red computacional entre empresa y cliente; el cliente comparte responsabilidades en el programa de producción porque con la información de tiempo real del cliente se diseña el plan de producción de planta y a la vez se informa de los ciclos de producción en el piso de manufactura al tener acceso libre a las bases de datos de la compañía; con las bases de datos compartidas puede informar a ventas y producción de los embarques parciales y adicionales que requiere y con fechas programadas logrando mayor eficiencia en la programación de producción.

Con el ejercicio anterior mostrando el Sistema de Manufactura y sus características críticas para los escenarios tradicionales y SMIC, es claro concluir que la diferencia reconocible entre ambos escenarios son las bases de datos compartidas con acceso e interacción múltiple de usuarios. No es el hecho de tener computadoras en el Sistema de Manufactura, o una red con terminales de acceso a usuario, sino el conocimiento de las bases de datos, la información contenida y el uso de esa información confiable y fidedigna manejada en tiempo real para la mejor toma de decisiones. De allí que el escenario SMIC sea de resultados efectivos en costo, calidad y tiempo de ciclo y presumiblemente mucho muy superior a un escenario de empresa tradicional. Por esa razón se dice en el ambiente de manufactura que un SMIC es comunicación efectiva entre todos los componentes del sistema, o más aún: "excelencia en la comunicación". En cada una de las etapas del Sistema de Manufactura se tienen datos de entrada y datos de salida lo que significa que cada etapa produce información y esta es utilizada para la toma de decisiones en tiempo real lo cual asegura un desempeño superior del Sistema de Manufactura. Sin embargo, no olvidemos que las computadoras y las bases de datos así como las redes son sólo medios o recursos para incrementar la efectividad y rentabilidad de la compañía. Un concepto práctico y poderoso es el uso interactivo de los sistemas de información y bases de datos en el SMIC. Es importante recordar que dentro del SMIC existen tres grandes componentes fundamentales de igual relevancia o peso específico y con una configuración que permite tanto decisiones propias como decisiones integradoras tomando a los tres componentes en una visión integral.

Un punto importante para observar es el estimador de valor agregado. En todo proceso de manufactura el valor agregado ocupa un 20% del tiempo de ciclo de manufactura el restante 80% se dedica al diseño, la transportación de materiales, planeación, medición y control. En un escenario tradicional la planeación, medición y diseño son efectuadas manualmente o incluso con computadoras pero con bases de datos independientes, sin relación o interacción alguna entre las funciones mencionadas, lo que provoca una escalada de errores cuyo impacto en costo, calidad y tiempo de ciclo es enorme. Es por esa razón que los autores más renombrados en el campo de los SMIC dejan claro que existe una gran diferencia significativa entre las "islas de automatización" con bases de datos independientes y mínima o nula interacción entre las funciones de diseño, manufactura, ingeniería, materiales, ventas y logística y el SMIC, el cual posee una o varias macro-bases de datos compartidas entre las siete etapas del Sistema de Manufactura mediante una red

computacional de acceso rápido y un lenguaje preciso y entendible por todos los usuarios y de igual forma, con modelos matemáticos o administrativos para diseño, planeación, programación, medición, control, abastecimiento, costos, ventas y logística. Adicionalmente la posibilidad de interacción con información entre proveedores, fabricantes y clientes. Lo anterior es la búsqueda de un propósito: maximizar la rentabilidad de la compañía en la fabricación de producto para los clientes, razón de existencia de las compañías de manufactura. A causa de la importancia de las bases de datos en el SMIC describiremos algunas características principales del tipo de bases de datos y sus arquitecturas, además de los conceptos de control. Una base de datos es un ensamble organizado de información que un usuario o grupo de usuarios puede acceder para algún propósito en particular. El propósito fundamental del SMIC es mejorar el potencial de utilidades a través de una excelente comunicación mediante la integración del Sistema de Manufactura. Las bases de datos son el vehículo para almacenar, relacionar, utilizar y manejar el sistema de manufactura en su totalidad. Sin embargo, es obvio que la información debe estructurarse según sea la necesidad de los usuarios.

Algunos factores que deben considerarse para definir la estructura a utilizar son los siguientes:

- tipos de datos a almacenar
- cantidad de datos para almacenar
- número de archivos requeridos
- uso de los datos
- velocidad de acceso requerida
- flexibilidad de cambio
- control de acceso
- mantenimiento del sistema

El uso de bases de datos está limitado por usuario, área, nivel o función dentro de SMIC. Existen tres arquitecturas internas clásicas para el arreglo de las bases de datos, las cuáles son:

- jerárquica
- de red
- relacional

Se describirá brevemente cada una de las arquitecturas,

### **Base de datos jerárquicas**

Son bases de datos direccionables y manejadas por nivel de autoridad o nivel jerárquico en una organización de posiciones de mando. Generalmente se limitan los campos de acceso e interacción a medida que se descende de nivel. Es lógico que la máxima jerarquía de acceso se encuentre asignada a la más alta jerarquía de la función. Un ejemplo común lo representa el nivel de mando directivo, gerencial y de jefatura en semejanza con el manejo jerárquico de las bases de datos que maneja cada nivel funcional o a los campos de acceso permitido en las mismas bases de datos. A mayor jerarquía funcional mayor número de campos de información de acceso y manejo de la información. Este tipo de bases de datos no es útil para SMIC. Incluso se aprecian “islas de información” contrario a la práctica de bases de datos comunes y compartidas para las funciones de un SMIC.

### **Bases de datos de red**

Esta arquitectura está basada en el uso compartido de las bases de datos para diferentes funciones de una organización. De hecho es posible crear bases de datos compartidas entre dos, tres o más funciones. En teoría sería posible crear una estructura de permutaciones compleja para compartir las bases de datos entre todas las entidades funcionales. Por ejemplo, una base de datos de ingeniería relativa al diseño puede ser útil para el ingeniero de manufactura y para el ingeniero de calidad, para comparar parámetros de diseño con variables de proceso y factores de calidad en el campo de uso del producto. Otro caso clásico es la base de datos compartida de los defectos en campo para el ingeniero de calidad, el personal de costos y finanzas así como para el ingeniero de diseño que permiten considerar aspectos del diseño, calidad y costo. Algo que sería virtualmente difícil en una estructura jerárquica por no tener posibilidad de compartir información de otras bases de datos. Precisamente las bases de datos compartidas convierten un sistema de computadoras en red en una herramienta poderosa para la toma de decisiones a través de la comunicación excelente. Este es un tipo de base de datos compatible con las necesidades de un SMIC.

### **Base de datos relacional**

Su propósito es ofrecer flexibilidad en la información de las bases de datos en el sistema. Es decir, utilizar las bases de datos creadas para formar nuevas bases de datos a partir de la relación indexada de campos de información en cualesquiera dos bases existentes. Por ejemplo, si en una base de datos de calidad se encuentra un campo de datos del defectivo en uso y en otra base de datos existe un campo con los costos por

defecto y en otro campo los costos por garantía se puede construir una nueva base de datos con estos tres campos de tal forma que se obtenga toda la información en términos de costo unitario (unidad defectuosa -defectivo) o costo de garantía en un periodo determinado por causa de un defecto en particular o el costo total de garantía en un periodo de tiempo específico. La posibilidad de creación de nuevas bases de datos son inmensas pero esta cualidad podría afectar la velocidad de respuesta o la necesidad de mayor capacidad de almacenamiento de información en forma demandante e intensiva.

Existen otras arquitecturas de tipo externo que no serán tema de este trabajo por ser un campo muy extenso en la ingeniería de ciencias de computadoras, pero como una regla básica podemos establecer que las bases de datos seleccionadas para el SMIC deben satisfacer al menos cuatro criterios principales:

1. Datos disponibles cuando se requieran
2. Datos completos no fragmentados
3. Datos en formato reconocible
4. Facilidad de los usuarios en el acceso a los datos

De las arquitecturas de bases de datos brevemente explicadas es claro que la estructura tipo relacional y de red cumplen con las características listadas. La **tabla 5.6.1** es un tabulador comparativo se muestra a continuación entre los tipos de arquitecturas y calidad de cumplimiento en los criterios (D.Koening, 1988)

**Tabla 5.6.1** Tabulador comparativo de las bases de datos

<b>Características de los datos</b>	<b>Base de datos Manual</b>	<b>Base de datos Jerárquica</b>	<b>Base de datos Red</b>	<b>Base de datos relacional</b>
1. disponibilidad si es requerida	Pobre	Regular	Bueno	Excelente
2. integridad y completez	Pobre	Bueno	Excelente	Excelente
3. reconocibilidad y entendibilidad	Pobre	Pobre	Regular	Bueno
4. accesibilidad	Pobre	Pobre	Bueno	Excelente

De la tabla se concluye que la alternativa viable para el soporte de un Sistema de Manufactura Integrado por Computadora (SMIC) es la base de datos relacional.

### **Recursos Computacionales en un SMIC**

Si las bases de datos son sumamente importantes, lógicamente que los recursos computacionales también lo son, en igual o mayor grado. Un esquema recomendado de los tipos de estructura computacional y sus recursos para dar soporte a un SMIC se presenta a continuación:

Nivel 1: computadora de propósitos generales-baja velocidad-alta capacidad

- Administración de órdenes de clientes
- Programa maestro de producción

Nivel 2: computadora de tamaño medio-velocidad media-capacidad media

- Órdenes de material a producción
- Material recibido en almacén
- Horas laboradas por el personal
- Planeación de operaciones en la estación de trabajo
- Reportes de control de producción

Nivel 3: mini-computadora de propósitos especiales-velocidad media-alta capacidad

- Manejo de datos de ingeniería
- Modelos matemáticos para solución de problemas

Nivel 4: mini-micro computadora de propósito especial-alta velocidad-baja capacidad

- Reporte de horas de mantenimiento del equipo
- Control de herramientas de máquina
- Control de datos de manufactura
- Registro de producto terminado

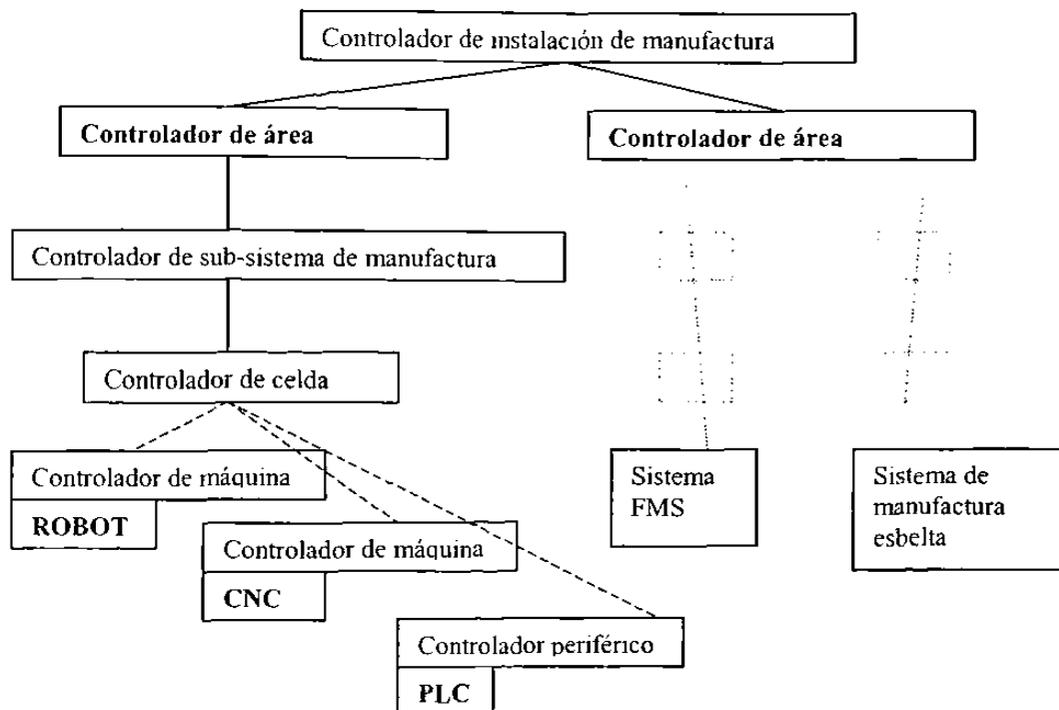
### **Recursos de Manufactura en un SMIC**

La utilización de los recursos avanzados de manufactura en un SMIC es intensiva y de amplio espectro. Todos los recursos conocidos son usados en la configuración de un SMIC posiblemente no en forma simultánea, pero todos disponibles en el sistema de manufactura de este tipo. Es frecuente encontrar en las configuraciones de los SMIC reales la disponibilidad de la gran mayoría de los recursos avanzados de manufactura. En algunas publicaciones o folletos de proveedor y revistas de divulgación de escasa seriedad y

profundidad se ha atribuido al SMIC únicamente características de control máquina-proceso lo cuál evidentemente es un gravísimo error. Se sabe que un SMIC está sustentado en tres grandes fundamentos: control máquina-proceso, control de diseño y planeación y control de producción y medición, por lo que es obvio que la configuración de recursos de manufactura en un SMIC es sólo un elemento de la triada. El control máquina-proceso es la parte visible de la porción de un SMIC y cada uno o el conjunto de los recursos avanzados de manufactura tales como: máquinas N/C, máquinas CNC, dispositivos de transferencia automatizada, y robots son tecnologías poderosas pero insuficientes para formar por sí mismos un SMIC. El control máquina-proceso consiste de dispositivos mecánicos usados para crear el producto, transportarlo, almacenarlo temporalmente como producto semi-terminado y finalmente almacenar el producto terminado. También comprende el despliegue de herramientas de máquina apropiadas para las estaciones de trabajo así como las computadoras asociadas y el *software* (lenguaje y programas de cómputo) para hacer que estos dispositivos trabajen. La introducción de computadoras al control de herramientas de máquina o a un proceso, es un cambio profundo en la tecnología de manufactura, es por decirlo con más propiedad un cambio de paradigma. Por ejemplo, en un ambiente de manufactura una herramienta de máquina puede efectuar una o más de las siguientes operaciones: perforado, taladrado o barrenado, torneado, fresado, conformado, troquelado, granallado, decapado con abrasivo, formado, etc. Estas operaciones son el universo práctico de lo que puede realizarse con materiales de ingeniería: acero, madera, plásticos, cerámicas, aluminio, cobre, titanio, etc., con los cuáles está construida nuestra sociedad moderna. La computadora trajo consigo una nueva visión del trabajo de manufactura. Cualquier experimentado y conocedor de las máquinas CNC (un oficial o maestro maquinista) puede operar una máquina eficientemente. El poder de una computadora reside en "aprender la operación" o ser programada en lenguaje de ingeniería para reproducir el trabajo de una máquina en una multitud de máquinas similares. Esto da una idea del papel que desempeñan las computadoras con su revolución y alcance de la manufactura. Aún recursos tan avanzados como los dispositivos de montaje de circuitos, sensores, sistemas automatizados de transportación de materiales y robots pueden ser manejados por una computadora. Con el propósito de aclarar el verdadero objetivo de un SMIC huelga consignar que la computadora tan sólo es un medio, una herramienta o tecnología de control por más poderosa que pueda ser su contribución al Sistema de Manufactura. Un esquema de FMS representa el más avanzado ejemplo de

control máquina-proceso en un SMIC. En la **figura 5.6.1** aparecen los recursos de manufactura en una arquitectura típica de un **Sistema de Manufactura Integrado por Computadora (SMIC)**.

**Figura 5.6.1** Diagrama típico de un control jerárquico en un SMIC



La **tabla 5.6.2** muestra los beneficios de un FMS (Flexible Manufacturing System) dentro de un SMIC.

**Tabla 5.6.2** Beneficios de un FMS dentro de un SMIC

<b>Beneficios</b>	<b>Control máquina proceso</b>	<b>Control de producción y medición</b>	<b>Control de diseño y planeación</b>
Operación de equipos en tiempos precisos	X		
Minimiza trabajo directo		X	
Minimiza tiempo de ciclo			X
Reducción de inventario en proceso		X	
Reduce herramientas y requerimientos de moldes, escantillones y dispositivos		X	
Se obtiene alta flexibilidad		X	

### Proceso de Planeación Asistido por Computadora en un SMIC

La planeación del proceso asistido por computadora es la automatización de métodos, estándares y funciones de planeación de ingeniería de manufactura. Existen dos elementos fundamentales en la planeación de una empresa de manufactura o de servicios, estos son:

1. Conocimiento de manufactura del producto (know how)
2. Conocimiento de los tiempos, movimientos y espacios para fabricar el producto (know what)

El primer elemento trata con el conocimiento científico y procesos de ingeniería. El segundo elemento determina el tamaño de las instalaciones de planta (facilities). Un factor sumamente importante es el cálculo de secuencias de fabricación para evaluar el tiempo de ciclo de manufactura así como establecer el orden de operaciones o secuencia plausible de manufactura. Con la información anterior es posible llevar a cabo la programación de producción, una pieza clave en la fabricación de un producto y la administración de los recursos productivos. El proceso de planeación a gran escala con requerimientos de gran precisión debe basarse en conocimiento científico y de ingeniería; está fundamentado en el concepto de que cada actividad puede ser descrita matemáticamente como una serie de eventos (fuerzas y momentos, velocidades y aceleraciones) entre humanos y máquinas. Este proceso desarrollado por los pioneros de la Ingeniería Industrial es llamado *economía de movimiento* y es la base de los estándares de tiempo desde una perspectiva científica. Este punto de vista de la ingeniería permite obtener trayectorias de movimiento y tiempo requerido para cada movimiento individual de un proceso. Un sistema de planeación de proceso asistido por computadora contiene ocho elementos básicos:

1. Métodos e instrucciones
2. Estándares de ingeniería
3. Planeación de operaciones
4. Generación de secuencia y ruta
5. Rastreabilidad de noticias de cambio de ingeniería
6. Clasificación y codificado de tecnología de grupo
7. Capacidad de planeación (variante o semi-generativa)
8. Interfases con otros módulos de SMIC.

### **El Control Estadístico de Proceso en un SMIC.**

El sistema de control de calidad es otra columna de soporte del control de producción y medición dentro del SMIC. El control de calidad puede pensarse como la conciencia activa del negocio y su propósito es mantener a los clientes con la seguridad de que las especificaciones del producto que ellos compran poseen las características, atributos o valores previamente acordados documentalmente. Esta actividad de monitoreo de la producción y la evaluación de su aceptación o rechazo es un modelo de práctica desde los años de la Segunda Guerra Mundial. Las actividades del control de calidad se fueron extendiendo a otras funciones de la empresa o del piso de planta al grado de difundirse en abastecimiento, diseño, ingeniería, manufactura, logística, mantenimiento, distribución y servicios que por ello tomó el nombre de *calidad total*. Es decir, el concepto de control de calidad como función de simple inspección y monitoreo cayó en la obsolescencia. Inclusive durante muchos años en los Estados Unidos permaneció un concepto de los tiempos militares de la Segunda Guerra Mundial y cuya práctica real permitía producir producto defectuoso (defectivo) en la producción regular. A tal grado llegó esta práctica que un indicador AQL (Acceptable Quality Level), nivel de calidad aceptable, legitimizó por décadas una producción con defectos o un salvoconducto para alcanzar ciertos niveles de calidad y no preocuparse por mejorar la calidad de la manufactura. Posteriormente, el arribo de científicos e ingenieros talentosos a la industria, con más énfasis por el trabajo excelente y obligados a la optimización de costos, enfocaron los esfuerzos a evaluar la producción en la línea de manufactura con técnicas estadístico matemáticas aplicadas al control de calidad; gestándose una nueva y revolucionaria técnica llamada Control Estadístico de Calidad (SQC: Statistical Quality Control) siendo su creador el Dr. Walter Shewart y llevados a Japón por el Dr. Edward W. Deming y el Dr. Joseph Juran. La aplicación del control estadístico de calidad en su versión computacional y aplicada directamente por personal de línea a los procesos de manufactura fue denominada control estadístico de procesos (SPC: Statistical Process Control). Al convertirse la calidad en un concepto de cobertura total permitió aplicar las herramientas dirigidas a la manufactura en áreas como: diseño, para introducir las mejores prácticas del diseño basada en parámetros estadísticos; abastecimiento, para abandonar la práctica de compra basada en precio y establecer una metodología de compra basada en calidad de producto como primer requisito y precio y tiempos de entrega como requisitos complementarios. La integración del control estadístico de procesos al SMIC fue realizado sin problemas en virtud de que el *software* (programa de computadora) conocido como SPC se instaló

rápidamente en el sistema de cómputo del SMIC con la ventaja de acceder información de todo el proceso en tiempo real y la oportunidad de analizarla en pantalla para la toma de decisiones en el piso de planta, en compras, logística y ventas. Dentro de la estructura de colección de datos en un SMIC se tienen:

1. Mediciones de variables de proceso
2. Mediciones de características de producto
3. Informes de defectos y defectivo
4. Pruebas de calidad
5. Pruebas de diseño
6. Registro de acciones correctivas
7. Acciones correctivas y resultado
8. Información de calidad de la materia prima y productos de compra

con el objetivo de reducir pérdidas de manufactura, minimizar tiempos de paro en operaciones y mejorar la calidad del producto.

#### **Planeación de Recursos de Manufactura**

A pesar de la controversia que existe en la última década sobre la utilización de MRP II o Just in Time como elemento de optimización en un sistema de manufactura, cada uno posee cualidades o características conceptuales que en un SMIC se complementan en forma práctica para lograr una combinación de procedimientos poderosos y útiles. Incluso más allá de una pugna utilitaria por preferencias, el SMIC los reúne para construir un sistema dual de información de todos los recursos necesarios para la manufactura (MRP II) y de los recursos de asignación por demanda en su forma más simple (Just in Time). No es de nuestro interés polemizar a causa de este problema de preferencias personales o discutir la rivalidad del MRP II (EUA) y Just in Time (Japón) como técnicas de optimización o tomar partido, antes al contrario, lo que deseamos apuntar es el aprovechamiento de ambas infraestructuras dentro de un SMIC. En el piso de planta el manejo de materiales para abastecer las líneas de producción es un trabajo que requiere conocimiento de los tipos de componentes o partes, cantidades requeridas y existencias presentes; con el propósito de abastecer por compra anticipada o recepción planeada. Justo a Tiempo (JIT) es un método que nació sin requerir el uso de computadoras y es un promotor de la productividad basado en la simple proposición de eliminar el desperdicio en el proceso de manufactura. La teoría de JIT establece que el desperdicio se elimina, en forma

inicial, con sólo cambiar de un sistema de abastecimiento de cuotas continuas (push system) a uno de abastecimiento por demanda (pull system) en el control de producción. El énfasis en JIT es el control de producción y la reducción del inventario porque es en este renglón donde se encuentra el más grande componente del desperdicio. Sin el uso de computadora sólo se mueve material cuando es requerido y la operación se realiza manualmente. Ahora se conoce que lo anterior fue precisamente lo que Toyota Corp. hizo. Esta corporación es reconocida como el mayor proponente y creador del Just in Time (JIT). Los creadores de JIT instituyeron una técnica de programación de reversa que iniciaba con la fecha de embarque deseada. Así, se permitía programar las fechas límites de fabricación del producto terminado y en consecuencia fechas límite para fabricación de ensamble, sub-ensamble y componentes así como fechas de compra. Continuando el proceso regresivo se llegaba a establecer la fecha exacta para recibir los materiales y partes de fabricación en los almacenes de la compañía de manufactura de Toyota Co. Un concepto adicional es que el material en la línea se utiliza sólo cuando se requiere y no se envía a la siguiente estación de trabajo hasta que es solicitado. Dicho método fue denominado como *kanban*, sin embargo, kanban es operado con métodos de fuerza bruta (sin el uso de máquinas) a comparación de MRP II que utiliza recursos computacionales de programación integral para la producción. Podrá cuestionarse a JIT y kanban pero lo que es incuestionable desde un punto de vista de claridad intelectual son sus resultados en la reducción de inventario, tiempo de ciclo y desperdicio. Un listado de los objetivos de la teoría de Justo a Tiempo aparece a continuación.

#### Objetivos de la teoría de Justo a Tiempo

1. Producir el producto que el cliente requiere
2. Producir los productos únicamente en la cantidad que el cliente quiere
3. Producir con calidad perfecta
4. Producir instantáneamente; sin paros ni tiempos muertos
5. Producir sin desperdicios de trabajo, material o equipo
6. Producir con métodos que produzcan el desarrollo de la gente (personal)

Un análisis magistral de los seis puntos, sus trivialidades y contrasentidos así como la demostración de que para cumplirlos se requiere obligatoriamente el uso complementario de MRP II está presentado en **Computer**

**Integrated Manufacturing-D. Koenig- 1990. Hemisphere Publishing Corp. Págs. 95-120.** En esta referencia su autor reduce los principios de JIT a propuestas elementales de Ingeniería Industrial y su dificultad de lograrlos sin los principios fundamentales de un SMIC, donde MRP II, creado por Oliver W. Wight es presentado como el auténtico pionero de una visión unificada de la manufactura asistida por computadora con un alcance de amplio espectro para integrar todas las operaciones en una corporación industrial. Para una referencia extensa y aplicaciones de MRP II y su uso dentro de un SMIC puede consultarse **“The Executive’s Guide to succesful MRP II, Oliver W. Wight, Essex Junction, Vermont 1982.** La aplicación de MRP II dentro de un SMIC es casi natural por su utilización de computadoras en el manejo de las bases de datos para el diseño, manufactura y calidad. La complejidad de los sistemas de manufactura obliga al uso computacional de la información para el análisis de datos y la toma de decisiones. En la actualidad JIT y kanban se utilizan con recursos computacionales dándole la razón a D. Koenig acerca de la necesidad de abandonar los métodos de fuerza bruta en tareas de control y administración de la manufactura.

#### **El lenguaje preciso en un ambiente de un SMIC.**

El sistema de manufactura conocido como tecnología de grupo (GT) es utilizado dentro de un SMIC en razón de su lenguaje preciso para la fabricación. GT es una especie de código genético de un SMIC. Si el código genético describe la entidad biológica, de igual forma GT describe la entidad física (producto) que nosotros manufacturamos conjuntamente con el proceso empleado. Comparativamente el RNA/DNA (RNA: ácido ribonucleico, DNA: ácido desoxirribonucleico) describe un código preciso de información de lo que es un sistema biológico; GT es exactamente similar para describir lo que es un producto dentro de un sistema de manufactura. Sin un código preciso, entendible, comunicable y accesible las operaciones de manufactura de producto serían verdaderamente complejas y además confusas. Un solo código para describir la manufactura de un producto posee grandes ventajas para reducir la complejidad e incrementar el entendimiento y práctica de la fabricación. Una ventaja más, la repetibilidad es posible con sólo cargar el programa de computadora (instrucciones de fabricación de GT) en la máquina correspondiente; o a través de la red computacional o de comunicación ordenar la fabricación con el mismo código y replicar la manufactura de un bien dirigido al consumidor o cliente. Suele darse el caso que la estación donde se generó el código está muy distante de la planta de manufactura y entonces proceder al envío via electrónica (e-mail) de red puede cargarse en forma

direccionada en las máquinas adecuadas. Es claro que un lenguaje común es necesario dentro de un SMIC. El lenguaje seleccionado como elemento de comunicación y entendimiento debe poseer las siguientes características:

1. Significado preciso: una sola forma para definir un elemento, operación o resultado.
2. Estructura compacta y simple: símbolos y significados que con brevedad son entendibles.
3. Fácil de usar: rápido y conveniente para su aprendizaje.

Un SMIC requiere comunicación excelente y los códigos de GT (Group Technology) ayudan a lograrlo usando el principio de similitud en el que GT se basa. El principio de similitud establece que las formas, materiales y requerimientos de manufactura similares pueden ser producidos con métodos semejantes. Uno de los usos más poderosos y de extrema importancia, es sin duda, la aplicación como lenguaje fundamental de un SMIC para la fabricación específica de familia de partes. El principio de similitud facilita que las partes manufacturadas se agrupen por geometría, proceso de manufactura o por uso final de las partes. El conjunto de caracteres significantes y sus reglas de interpretación varían dependiendo de las características o información relevante e independiente (no redundante) incluida en la estructura del código. Se han elaborado códigos para GT de 7, 10, 15 ó más caracteres en la estructura del código, este tema es una especialidad de ingeniería de programación computacional y queda fuera del alcance del presente trabajo. Para ilustrar las estructuras de un código se presenta a continuación un esquema de código simple de GT y su estructura significativa o número de dígitos en cada campo de información:

**código**<A 3 43 6 3 1 > **con la estructura significativa (número de caracteres )**<1,1,2,1,1,1>

**descripciones del código:**

A: tipo de familia (A-planas, B-cónicas, C-esféricas), 1caracter

3: especificación de material (por ejemplo, acero inoxidable), 1caracter

43: longitud total (centímetros), 2 caracteres

6: diámetro mayor (centímetros), 1caracter

3: diámetro de asiento (centímetros), 1caracter

1: rasgo característico (1-acabado espejo, 2-acabado diamante, 3-acabado rugoso), 1caracter.

Es decir, otro código posible es <B 1 39 12 7 3> y con estructura significativa similar al ejemplo preliminar porque este parámetro es invariante una vez definido. No existe límite para código y estructura pero para usos prácticos se recomienda como máximo 15 (quince) parámetros para el código (geometría, material, acabado, máquina procesadora, herramienta de máquina, operaciones de transformación, etiqueta, ensamble, número de serie, etc.) y con ello definir completamente las instrucciones de fabricación de un producto por muy complicado que se presente. El uso de códigos en la fabricación nos permite efectuar análisis de estructuras y la repetibilidad de geometrías, materiales o procesos en un grupo de productos. Es obvio que cuando encontramos frecuencias altas de repetición, en una o más unidades de la estructura del código, estamos frente a la posibilidad de agrupar productos por sus características; asimismo cuando la frecuencia de repetición ocurre en varios parámetros del código estamos en oportunidad de definir una familia de productos.

#### La Inteligencia Artificial en un SMIC

El campo de la manufactura ha tenido grandes revoluciones en sus tecnologías de fabricación. Desde la creación de la línea de producción, la introducción de las máquinas, la creación de recursos electrónicos y desde luego las computadoras ningún tema ha sido tan controversial como el de la Inteligencia Artificial. Se estimó la complejidad de un SMIC al integrar todas las operaciones mediante bases de datos compartidas y tomas de decisiones en tiempo real (mínimo retardo desde el punto de vista práctico). El uso de códigos de tecnología de grupo (GT) y la posibilidad de crear combinación de miles, cientos de miles y aún millones de productos diferentes (número de alternativas en cada característica x número de características en el código) ejemplo:

<b>Características:</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>
Alternativas:	3 x	5 x	3 x	6 x	4 x	7 = 7560 productos diferentes

hacen casi imposible para el operador, elaborar en el piso de planta, sin la ayuda de los lenguajes de código de programación. instrucciones de manufactura claras, precisas y efectivas los productos o bienes requeridos. La automatización trajo una oportunidad de enfocar los esfuerzos del recurso humano a tareas con valor y la estandarización de productos (mínimas alternativas) la reducción de variedad en la producción. Como consecuencia de estos conceptos el operador dentro de SMIC está siendo involucrado en tareas pensantes de

disposición de materiales, labores de supervisión, control de calidad, verificación de funcionamiento de máquinas y dispositivos y comprobar que la operación total del sistema de manufactura se encuentra dentro de los parámetros o condiciones adecuadas y previamente planeadas. Controlar todas estas actividades, sin el uso de máquinas no está al alcance de la capacidad del hombre común y menos para procesar información y actuar en consecuencia con resultados casi perfectos. De allí que podemos cuestionar si en el campo de la Inteligencia Artificial (IA), ¿pueden elaborarse programas de computadora para registrar y analizar información y posteriormente tomar decisiones y aún, corregir procesos con acciones defectuosas?, ¿pueden elaborarse programas de computadora para el pensamiento creativo y el pensamiento generativo (ideas) o activo (iniciativa). La Inteligencia Artificial tiene como propósito crear máquinas pensantes o reflexivas (cualquier definición podría ser válida) y que emulen los procesos del pensamiento humano. De hecho, es un propósito académico y de investigación la creación de algoritmos o estructuras de programación que asistan al profesional en el campo de la experiencia. A estas estructuras se les conoce en el medio académico e industrial como Sistemas Expertos o Sistemas de Conocimiento. El estado del arte en la inteligencia artificial, aunque parezca un aserto trivial es: *ninguna computadora piensa*. Las computadoras, hasta ahora no poseen la capacidad del pensamiento generativo (creativo) o de iniciativa. Sin embargo, existen algunos intentos comerciales por dotar a los robots con programación en lenguajes superiores que permitan asistir al hombre en aplicaciones específicas. Por ejemplo, la Universidad de Stanford desarrolló "Mycin" y según los reportes de cumplimiento de tarea, la unidad experta realiza un excelente trabajo en ayuda médica para diagnosticar desórdenes en la sangre y meningitis. General Electric una de las compañías más diversificadas del mundo y con base de operaciones en los Estados Unidos desarrolló un sistema experto tipo troubleshooting de falla y solución para mantenimiento de máquinas de ferrocarril. General Motors, el gigante automotriz del mundo ha creado "Motors Charlie Program" para asistir al personal de mantenimiento en el diagnóstico de fallas en las fábricas de automóviles. Hasta ahora, estos programas son utilizados en aplicaciones muy específicas de mantenimiento. La verdadera aportación a un SMIC por parte de la Inteligencia Artificial está en una etapa incipiente, primitiva y justamente desarrollándose con programas para Sistemas Expertos de diseño, manufactura, calidad, mantenimiento, abastecimiento, logística, ventas y marketing. Desafortunadamente estos Sistemas Expertos se encuentran en una etapa de prueba. Un programa experto puede tardar años en desarrollarse y

probablemente no ser de aplicación eficiente en el campo de conocimiento intentado. La estructura de un Sistema Experto es como sigue:

#### **Base de conocimiento**

##### Máquina de inferencia (tipo I Y II)

Tipo I	Tipo II
Secuencia en línea directa	Secuencia en línea reversa
Cadena hacia adelante	Cadena hacia atrás
Datos conocidos	Solución conocida
Solución Lógica	Datos de origen

Una estructura de de decisión debe contener:

1. Hechos
2. Reglas
3. Solución inferida

La estructura de programación debe buscar un camino lógico y para ello es necesario basarse en los modelos de pensamiento lógico-matemático, pensamiento crítico, pensamiento selectivo, pensamiento analítico y pensamiento creativo-innovador. Existen Instituciones serias y prestigias en los Estados Unidos de América con trabajos de investigación en la teoría de programas de Sistemas Expertos, por ejemplo:

- American Society of Mechanical Engineers (ASME)
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)
- Institute of Industrial Engineers (IIE).

Estas entidades tienen textos y artículos científicos para consulta en sus bibliotecas físicas o electrónicas. Un punto de importancia es dejar claro que la estructura de programación (camino lógico a una decisión, resultado o solución) contiene todas las posibles elecciones de un conjunto de hechos. Es decir, la estructura de programación contiene todas las posibles decisiones, inclusive la subrutina de programación que permite a la computadora "aprender". Debemos ser objetivos para la aplicación del término aprender. La lógica de programación dota a la computadora (o programa) de un mecanismo de aprendizaje mediante la frecuencia de repetición de estados posibles y su consecuencia (decisión, resultado o solución). Ciertamente un programa de computación puede contener escenarios que/si (what/if) pero sólo puede relacionar estados con soluciones

predefinidas y no puede generar nuevas decisiones. Los programas de cómputo no dotan a la computadora con estructuras de programación para la generación de nuevas decisiones. Las estructuras lógicas de programación son sistemas no generativos o de campo finito. Lo que realiza la computadora no es un aprendizaje en el sentido humano, es exclusivamente un algoritmo fijo, el cuál requeriría otro super-algoritmo para cambiar el algoritmo fijo, lo que obviamente no ocurre en la programación de computadoras, como en la contraparte humana. Los seres humanos tenemos un sistema lógico de pensamiento o “estructura de programación” si se permite el uso del término, de crear escenarios que/si (what/if) y con un conjunto de experiencias repetitivas generar nuevas decisiones “ad infinitum”. A esto le llaman los científicos pensamiento abstracto. El ser humano es capaz de crear nuevas ideas y tomar mejores decisiones a partir de la experiencia y el conocimiento. La estructura o lógica de programación humana es un sistema generativo (que produce nuevas ideas y decisiones) y con sucesiones de campo infinito. Es extremadamente difícil acotar el número de estados posibles para las decisiones de un ser humano al enfrentarse a la solución de problemas. En otras palabras, un individuo puede utilizar dos algoritmos distintos o estructuras de pensamiento para resolver problemas diferentes o inclusive similares. Un caso distinto ocurre en las computadoras. El algoritmo que las programa es fijo. Esta es la limitante para los ingenieros de Sistemas Expertos, pero a la vez un reto fascinante. Desafortunadamente la grave escasez de recursos humanos en el campo de los Sistemas Expertos y Estructuras de Programación es dramáticamente seria para el desarrollo de la Inteligencia Artificial y su aplicación a la ciencia, la industria, la tecnología, la academia y el comercio. Los más connotados expertos y autoridades del campo consideran que la Inteligencia Artificial aún con todo su desarrollo de 50 años se encuentra alcanzando su periodo de infancia. Desde una perspectiva positiva, al ritmo actual de inversión y desarrollo en la formación de recursos humanos y presupuesto para la investigación, pasarán quizá otros 50 años para que la Inteligencia Artificial alcance su adolescencia tecnológica. En la perspectiva menos exitosa, algunas luminarias de la Inteligencia Artificial advierten que se requiere un nuevo paradigma en la programación de máquinas con estructuras, reglas y algoritmos que no tendremos disponibles hasta que profundicemos en el modelo y estructura de pensamiento humanos. Por otro lado, siempre será un reto dotar a las máquinas de una estructura de decisión similar al de los seres humanos. Este tema es en realidad una provocación al talento de científicos e ingenieros. Cualquier desarrollo exitoso en el futuro, se podrá integrar al SMIC para beneficio de la manufactura y por consecuencia para el bienestar de todos.

### Las Redes de Comunicación para el SMIC

Dentro de un SMIC el uso de bases de datos compartidas requiere, no sólo de computadoras sino de una estructura de comunicación, capaz de enlazarlas en una red de información de rápido acceso y fácil entendimiento para los usuarios. Proporcionar esta infraestructura al Sistema de Manufactura Integrado por Computadora (SMIC) es un requerimiento para disponer las estaciones de acceso y despliegue de información, que en la mayoría de los casos, procesan y despliegan información en tiempo real. Una estructura semejante debe también contemplar un diseño eficiente en la ubicación de terminales de computadora, niveles de acceso a información y toma de decisiones o interacciones con los programas de cómputo. Recordemos que los tres pilares básicos de la filosofía de un SMIC son:

1. control de máquina-proceso
2. control de diseño y planeación
3. control de producción y medición

por lo que el diseño de la red de comunicación debe estar enfocado a eficientar hasta el nivel de alto desempeño, la comunicación de la información de las bases de datos a todos los usuarios en el sistema. Las bases de datos se convierten en un arma poderosa para la excelencia en manufactura, mantenimiento, control de producción, calidad, ventas y logística. La integridad y la veracidad de la información se constituyen en elementos vitales para la toma de decisiones exitosas, por lo que la disponibilidad de terminales, la red de comunicación y la capacidad de procesamiento también juegan un papel primordial. Para crear un efecto de sinergia entre todos los componentes del sistema de manufactura y asegurar la efectividad en los resultados se requiere que los mensajes sean transferidos en forma rápida y precisa. Esto es un requisito para que los usuarios tengan buen desempeño en el sistema. En el ambiente del piso de planta se ha instituido, a través de la práctica, la "regla de los tres segundos" como una forma realista de enunciar una necesidad para el tiempo máximo de espera para una respuesta de la computadora. Estudios de Psicología demuestran que una espera mayor de 2 ó 3 segundos, en términos de cómputo, produce desaliento, desinterés y aversión. De aquí que no es saludable para la moral de los operarios y/o usuarios el retardo en la información, sin tomar en cuenta el daño o deterioro que sufre la productividad en la planta de manufactura o unidad de servicio. Los atributos que debe poseer un sistema de comunicación para un SMIC son los siguientes:

- a. Acceso disponible en cualquier punto de acceso.
- b. Un método fácil de transferencia de información entre usuarios funcionales.
- c. Un tiempo de respuesta rápido, usualmente de tres segundos o menos.
- d. Acceso a bases de datos comunes sin retardos o tiempos de espera intolerables (>3 seg.)
- e. Capacidad de fácil comunicación simultánea multi-usuario.

Un sistema de comunicación debe tener reglas de entrada para los mensajes y en esencia crear una línea de transmisión (*common-highway*) para entradas y salidas. A esto se le conoce como un *bus de datos* y se requieren frecuencias de sincronización para identificar mensajes en el circuito de transmisión. Como en una supercarretera el bus de datos es capaz de llevar gran cantidad de mensajes y hacer que lleguen a su destino rápidamente sin pérdida de contenido. El bus de datos común asegura la comunicación simultánea entre multi-usuarios, la fácil transferencia de información y una rápida respuesta sin considerar el número de usuarios. A toda esta estructura anterior se le llama una *red*, esto es, un conjunto de usuarios conectados mediante un portador de información común. La red utiliza dispositivos de comunicación, protocolos electrónicos y procedimientos de operación. El término usado para referirse a esta estructura y sus componentes es "Local Area Network" o LAN (Red de Área Local). Existen dispositivos típicos que forman el enlace en la red LAN como son computadoras, terminales de entrada de datos, herramientas de máquina y unidades de control de proceso MCU (Machine Control Units), procesadores de palabras, copiadoras, impresoras, faxes electrónicos, estaciones de trabajo de ingeniería y estaciones de prueba, líneas telefónicas, tableros de control. También se enlazan teléfonos ordinarios, cámaras de televisión, unidades de multimedia, reconocedores de voz e identificación digital, alarmas visuales, sonoras y luminosas, relojes y mecanismos de bloqueo electrónico así como actuadores y sensores especiales. El desarrollo de LAN es relativamente reciente para aplicaciones en manufactura, fue creada en la década de los 70's por un conjunto de pioneros de la electrónica y de las comunicaciones así como expertos en el campo de aplicación de computadoras. Actualmente se tienen dos versiones comerciales de mayor aplicación: Ethernet® y Wangnet®. Describiremos brevemente cada una a continuación.

### Ethernet®

Esta primera versión de LAN fue desarrollada cerca de 1980 por un consorcio de compañías, entre ellas, Xerox, Digital Equipment Corporation e Intel. La arquitectura de red provee un canal simple para transmisión digital. El canal tiene una capacidad de transmitir de 1 a 50 megabits de información por segundo entre los puntos de comunicación. No existe una lógica de conmutación dentro de la red, lo cual provoca que los usuarios requieran en sus terminales, independiente de la red, dispositivos de discriminación e identificadores, lo cual permite recibir sólo la información de interés para cada usuario. Los usuarios entran a la red en una forma similar a un automóvil entrando a una autopista. El conductor espera la entrada cuando el tráfico lo permite hasta alcanzar la velocidad promedio de la autopista. En el caso de Ethernet® se realiza una entrada en el cable coaxial con el mensaje usando los protocolos "Listen Before Talk" y "Listen While Talk". El dispositivo de Ethernet® que transmite y recibe tiene integrado un circuito electrónico que previene la transmisión de un mensaje si otro mensaje se encuentra en el cable coaxial y esperará de micro a milisegundos hasta que el mensaje en la red es borrado antes de transmitir el suyo. También mientras transmite escuchará (detectará) a otros dispositivos tratando de internarse a la línea de transmisión. Dependiendo de la prioridad en el próximo mensaje continuará o esperará para transmitir, similar a un tren de carga que ocupa una vía paralela para no interrumpir y a la vez ceder el paso a un tren de pasajeros mucho más veloz. A causa de este canal simple el número efectivo de usuarios es moderado. Un análisis matemático de este caso será tratado más adelante en el capítulo de los métodos matemáticos aplicados a la manufactura (ejemplos clásicos).

### Wang Net®

Esta LAN fue desarrollada por Wang Laboratories cerca de 1983. Difiere de Ethernet® en que es un sistema de transmisión análoga y que toma ventaja del amplísimo ancho de banda de televisión por cable. El antiguo Ethernet® usó transmisión digital. La diferencia entre digital y análogo es significativa. La transmisión digital tiene números y letras correspondientes expresadas directamente como caracteres de códigos binarios. De allí, que todas las letras y números tienen que ser convertidas a series de ceros y unos, donde cero es cero voltaje y uno es un voltaje unitario. El sistema análogo expresa números y letras directamente en cantidades medibles de voltaje. En algunos casos se interpreta girando una perilla o disco generando cambios en una resistencia

variable obteniendo códigos en niveles de voltaje para transmisión en la línea. El sistema análogo puede soportar transmisiones de voz, datos y video pero es mucho más complejo. Comparativamente Wang Net® cubre una extensión mucho mayor que Ethernet®. Normalmente Ethernet® cubre un área de uno o dos edificios aledaños, mientras que Wang Net® cubre un área de 50 km<sup>2</sup> para transmisión de datos, voz y video. Actualmente se utiliza como estándar de protocolo en comunicación MAP/TOP (Manufacturing Automation Protocol/Technical and Office Protocol) propuesto por General Motors y Boeing Aerospace ha sido utilizado en los equipos IBM, AT&T y Digital Equipment. Se han realizado esfuerzos en camino a un estándar de aceptación en las naciones industrializadas del mundo y la International Standards Organization (ISO) juega ahora el papel más importante para darle fin al problema de la "Torre de Babel" en los protocolos de comunicación electrónica de redes. OSI-Open System Interconnection significa interconexión de sistema abierto, el cuál es un estándar de comunicación mundial, quienes lo propusieron llevan la intención de utilizar lo que ya existe en este campo, para simplificar las tareas de estandarización. Donde es posible la especificación de MAP (Manufacturing Automation Protocol) usa la selección normal de estándares disponibles y adecuados para LAN. En donde no existen protocolos, son utilizados los estándares de General Motors. En un SMIC la comunicación es una característica fundamental para la integración de todos los elementos componentes, las redes locales LAN cumplen una misión determinante en la tarea de compartir las bases de datos, de tal forma que el interés por presentar este material en un estilo descriptivo es para entender la importancia de los protocolos y las ventajas de una estandarización que convierta en viables y económicamente adecuadas las perspectivas de integrar en gran escala las Redes Locales (LAN) a un Sistema de Manufactura Integrado por Computadora.

**CAPITULO 6**

**MÉTODOS MATEMÁTICOS USADOS EN LA MANUFACTURA**

El presente capítulo trata dos problemas clásicos desde el punto de vista analítico, esto es, mediante el uso de los métodos matemáticos. También se requiere considerar ciertas simplificaciones para obtener soluciones analíticas. Se presenta el caso de bloqueo o atascamiento (*jamming*) en las actividades de ensamble de partes mediante mecanos o robots. El caso es muy ilustrativo para confirmar la complejidad de tales análisis, pero también es muy útil para mostrar las técnicas simples de análisis y su aproximación al mundo real. Un segundo ejemplo lo constituye el análisis de la red Ethernet® y las matemáticas involucradas en el tratamiento de las señales y el proceso de comunicación. Ello permite exhibir un caso relativo a los procesos periféricos en la manufactura. Con este capítulo se desea transmitir modestamente la idea que el diseño, la manufactura, la calidad y la confiabilidad están lejos de ser disciplinas descriptivas y deben situarse como auténticas ciencias de la ingeniería. No intenta ser un compendio decorativo de matemáticas, sino más bien, lleva el interés de promover en los lectores del post-grado un genuino gusto por el conocimiento profundo de las matemáticas en aspectos modernos de ingeniería. Es un capítulo temático e ilustrativo.

### **6.1 Tratamiento Matemático del Problema Clásico de Ensamble en la Manufactura**

*Ensamble--bloqueo o atascamiento (jamming) entre espiga orificio.*

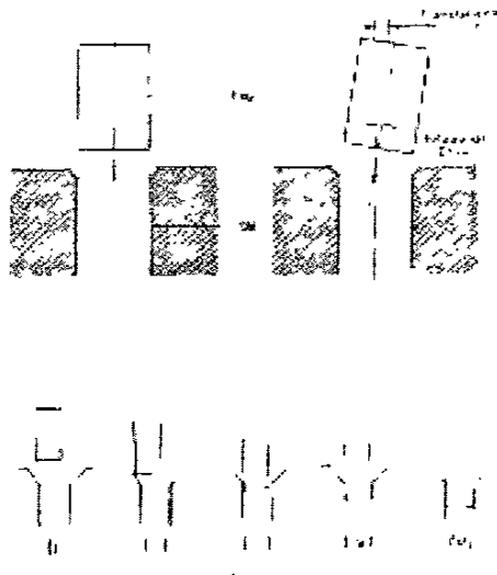
De acuerdo a expertos del ensamble automático (G. Boothroyd, Poli, Murch, 1982) el proceso de ensamble consume el 50 % del trabajo total, específicamente en trabajo de línea, mano de obra e inspección. El proceso de ensamble también es responsable de proporcionar el mayor valor agregado a un producto, por lo que es de gran interés para la reducción de costos y tiempos de fabricación. Una peculiaridad de esta operación de ensamble es la de mostrar los errores producidos en etapas previas de producción. Un componente con tolerancias fuera de especificación puede generar problemas de ensamble y el costo ser directamente proporcional al número de operaciones utilizadas para su ensamble. En la manufactura avanzada es de vital importancia el uso de robots industriales o máquinas (brazos o mecanos) de posicionamiento. De allí que sea verdaderamente importante establecer las operaciones de réplica humana que estos dispositivos deben desempeñar. Una secuencia general de ensamble para un operador humano que debe formar un arreglo con dos componentes o piezas de ensamble puede describirse como sigue:

1. La persona localiza, usando la visión, los objetos a ensamblar, uno a la vez.

2. La persona u operador moverá una mano para asir una parte y la otra mano para asir el otro componente.
3. Usando nuevamente la visión y su destreza manual reunirá los objetos.
4. Iniciará el movimiento para ponerlos juntos, ubicando la posición relativa de ambos objetos con sus ojos, corrigiendo esa posición relativa con sus manos; detectando cuando hacen contacto usando la fuerza sensitiva de sus manos.
5. Continuará el proceso monitoreando la inserción, la operación fundamental de ensamble, usando la fuerza y el sentido táctil en sus dedos.

El proceso de ensamble puede ser representado básicamente como el de inserción-de-la-espiga-en-el-agujero, esto es, ubicando una espiga cilíndrica dentro de una cavidad cilíndrica. Los problemas a los que se enfrenta esta operación son debido a la posición relativa de la espiga con respecto al orificio, siendo los errores traslacional y rotacional. El proceso de inserción posee cinco etapas esenciales las cuáles se muestran en la **Figura 6.1.1**, estas son:

**Figura 6.1.1** Proceso de inserción de espiga-orificio



- (i) Aproximación
- (ii) Cruce del chaflán o bisel en la orilla del orificio
- (iii) Contacto con un extremo superior del orificio

- (iv) Contacto con ambos lados del orificio
- (v) Deslizamiento dentro del orificio.

Para el tratamiento analítico de los problemas en el ensamble y observar las condiciones de éxito o fracaso es necesario considerar las fuerzas actuantes sobre las partes o componentes, así como consideraciones geométricas, donde las tolerancias pueden ser un ejemplo. Ha sido analizado de tal forma que la medición de fuerzas se realiza durante el proceso inserción y se retroalimenta a un manipulador de modo que su trayectoria pueda ser controlada para permitir el proceso d inserción exitoso. Posteriormente se registran coordenadas de posición para formar un vector de coordenadas espaciales, generando el programa de computadora que verificará con ensayos la precisión y exactitud, así como el tiempo requerido por el mecano, brazo o robot para efectuar la operación de un ensamble exitoso y la repetibilidad de ciclos de ensamble. Existen dos fenómenos que han sido definidos como “wedging” (encuñado, trabado) y “jamming”(bloqueo, atascamiento) para describir los casos en los cuáles la espiga parece “pegarse”en el orificio durante un contacto de dos puntos, mismo que impide el ensamble exitoso. Para efectos de ilustrar el fenómeno de “jamming” utilizaremos el análisis simple de D.E. Whitney (1982) y las simplificaciones siguientes:

- Se ignora el ángulo de inclinación  $\theta$
- Las fuerzas de fricción son paralelas al eje vertical de la espiga
- Las fuerzas de reacción  $f_1$  y  $f_2$  se consideran paralelas a las fuerzas  $F_x$  y  $F_z$
- Se considera un análisis bidimensional  $x - z$ .

El jamming es una condición en la cuál la espiga no se moverá a causa de que las fuerzas y momentos aplicados a la espiga, a través del soporte, están en proporciones diferentes. Las **Figura 6.1.2** y **6.1.3** muestran la relación del ángulo de aproximación y la longitud de penetración, así como el ciclo de vida de la inserción. Usando el diagrama de cuerpo de fuerzas actuantes y momentos de la **Figura 6.1.4**, resolviendo y tomando momentos en el

Figura 6.1.2 Relación de ángulo de aproximación  $\theta$  y longitud de penetración  $l$



Figura 6.1.3 Ciclo de vida de la inserción espiga-orificio

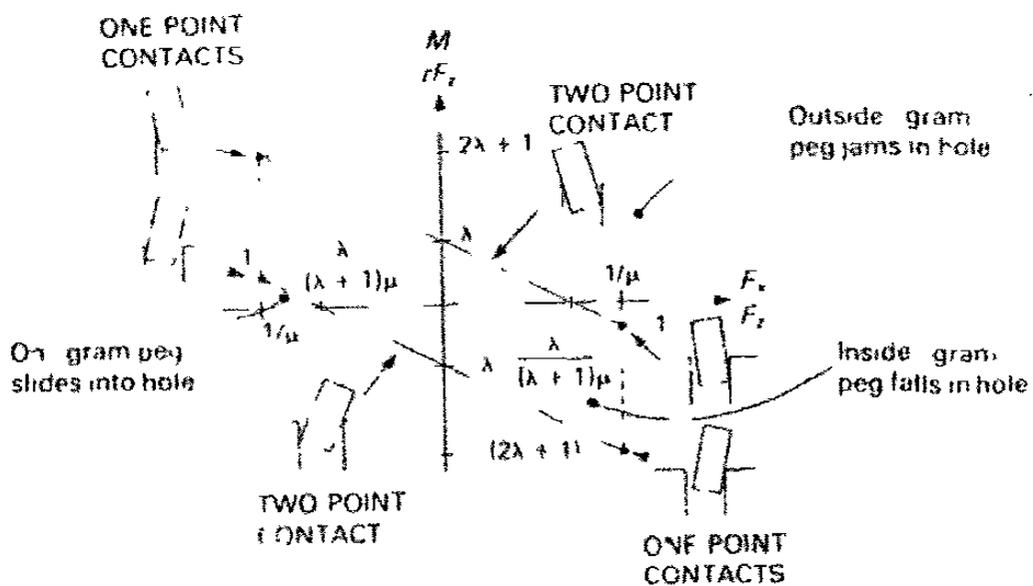
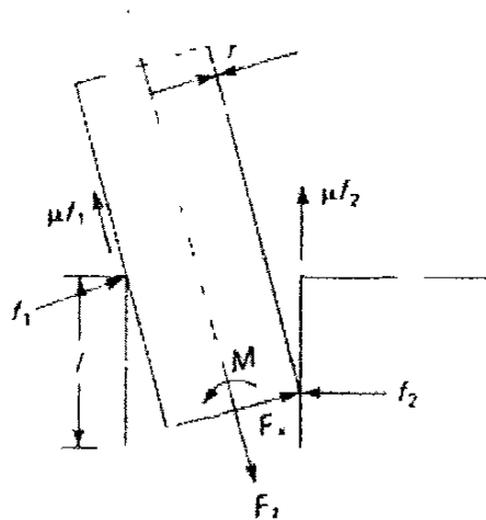


Figura 6.1.4 Diagrama de cuerpo de fuerzas actuantes y momentos



segundo punto de contacto; las ecuaciones de equilibrio que describen a la espiga deslizándose en el orificio estarán dadas por

$$Fz = \mu (f_1 + f_2) \quad \text{ec. i}$$

$$Fx = f_2 - f_1 \quad \text{ec. ii}$$

$$M = f_1 l - \mu r (f_2 - f_1) \quad \text{ec. iii}$$

Combinando estas ecuaciones tenemos,

$$M/rFz = (l/2r\mu) - (Fx/Fz)(l/2r + \mu) \quad \text{ec. iv}$$

Donde  $\lambda$  está definida por

$$\lambda = l/2r\mu$$

la ec. iv puede ser expresada como una ecuación de línea recta

$$y = mx + c$$

donde,

$$y = M/rFz$$

$$x = F_x / F_z$$

$$m = -\mu (l + \lambda)$$

$$c = -\lambda$$

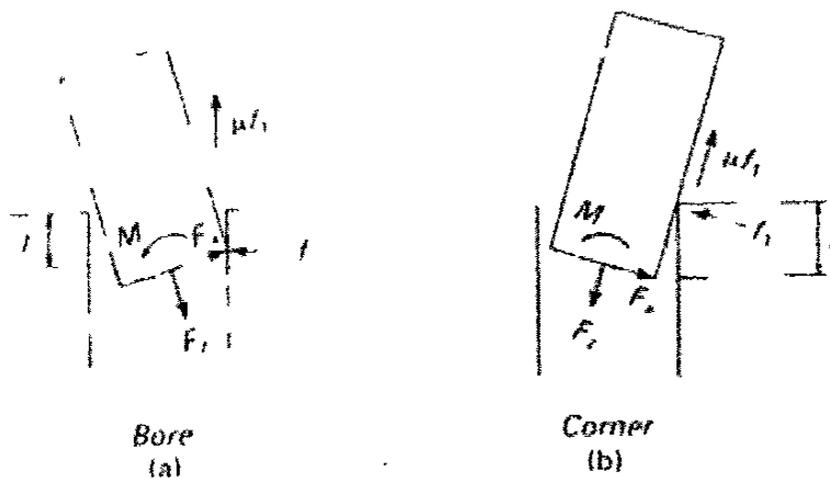
lo cuál podemos dibujar en ejes ortogonales X-Y.

Para el caso en que los puntos de contacto se inviertan en el diagrama, recordemos de la geometría analítica elemental, que la constante  $c$  representa la intersección de la recta con el eje y, es decir  $(M / r F_z)$  por lo que la solución se convierte en una recta paralela con ordenada negativa en el eje y, resulta entonces

$$c = -\lambda$$

La conclusión del análisis debe considerar los cuatro posibles contactos de un punto, contacto en la pared y contacto en la esquina con la espiga inclinada hacia ambos lados. Se consideran dos de estos casos para ilustrar el análisis (Figura 6.1.5). Para la Figura 6.1.6, el caso de contacto en la pared, tomamos momentos en  $f_1$  y resolviendo horizontal y verticalmente, las ecuaciones de equilibrio son:

**Figura 6.1.5** Contacto de espiga en interior    **Figura 6.1.6** Contacto de espiga en esquina



$$M + r F_z = 0 \quad \text{ec. v}$$

$$F_x = f_1 \quad \text{ec. vi}$$

$$Fz - \mu f_i = 0 \text{ ec.vii}$$

De las ecuaciones vi y vii tenemos

$$F_x / F_z = 1 / \mu \text{ ec.viii}$$

y dando la forma  $y = m x + c$ , usando las ecuaciones v y viii obtenemos

$$M / r F_z = - \mu (F_x / F_z) - 1. \text{ ec ix}$$

En forma similar de la **Figura 6.1.6**, con el contacto en la esquina las ecuaciones de equilibrio son

$$M + l F_x + \mu r F_x = 0$$

$$F_z - \mu F_x = 0$$

De tal forma que

$$F_x / F_z = 1 / \mu$$

$$M / r F_z = - (2 \lambda + 1)$$

Para los otros casos de contactos de dos puntos, obtenemos lo siguiente

$$F_x / F_z = 1 / \mu$$

y

$$M / r F_z = 1 \text{ ó } (2 \lambda + 1).$$

De acuerdo con la ecuación general de la línea recta estos cuatro puntos solución pertenecen a dos segmentos de rectas, las cuáles son paralelas por tener la misma pendiente  $m$  y la misma magnitud en la ordenada en el origen pero de signo algebraico contrario. Reordenado una ecuación general tenemos

$$M / r F_z = \pm \lambda - (F_x / F_z) \mu (1 + \lambda)$$

Donde los cuatro puntos son los extremos de estas líneas porque las líneas representan a la espiga deslizándose en el orificio. Si consideramos la desigualdad relativa a los valores de frontera en la ecuación  $\mu$  obtendremos

$$F_z \geq \mu F_x$$

o equivalentemente

$$(F_x / F_z) \leq (1 / \mu)$$

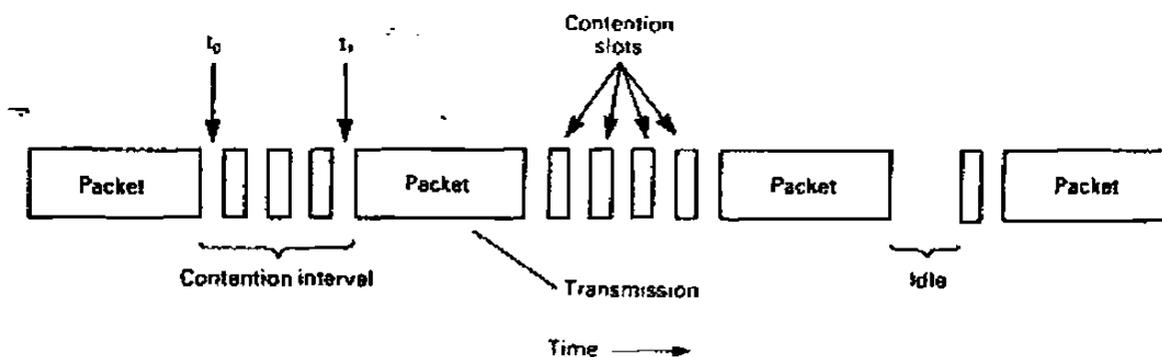
para contactos de un punto en el lado derecho y similarmente con el signo negativo para contactos de un punto en el lado izquierdo. Cocientes mayores de  $(F_x / F_z)$  dan como resultado bloqueos o atascamientos de contacto de un punto. Todo el análisis anterior puede ser ilustrado en la Fig. 6.13. Las líneas interrumpidas verticales en el diagrama describen un contacto de línea. También se puede observar que las combinaciones de  $(F_x / F_z)$  y  $M$  situándose en las líneas perimetrales del paralelogramo describen un equilibrio deslizando. Las combinaciones que se sitúan fuera del paralelogramo bloquean el deslizamiento de la espiga en el orificio, en casos de contacto en uno o dos puntos. Dentro del paralelogramo, la espiga está en desequilibrio deslizando o en caída dentro del orificio.

## 6.2 Tratamiento Matemático del Problema Clásico de la Comunicación Electrónica en la Manufactura

Un tratamiento matemático de la comunicación electrónica entidad fundamental de los dispositivos de soporte a la manufactura, es por necesidad y elemental justicia, material obligatorio en virtud que la manufactura moderna no puede ser concebida sin elementos tales como computadoras y sus aplicaciones en controladores, sensores, mecatrónica, robots, transportadores, máquinas de control numérico, etc. El presente análisis debido a D.J. Williams (1988) es un ejemplo representativo de todos estos dispositivos y máquinas indispensables para la operación del proceso de fabricación avanzado, donde el papel que juega la electrónica en la transmisión de información se ha convertido en la piedra angular para el desempeño integrado y eficiente de todos los recursos de la manufactura. Ethernet<sup>®</sup> es un tipo de red de área local (Local Area Network: LAN) para comunicación entre dispositivos de manufactura donde ha encontrado vastas aplicaciones y, de allí, que surja la justificación de presentarla como ejemplo.

La red Ethernet® es un ejemplo particular de un mecanismo detector de colisiones de acceso múltiple de sensor de portadoras (Carrier Sense Multiple Access Collision Detect: CSMA/CD) como se muestra en la Figura 6.2.1.

Figura 6.2.1 Detector de colisiones de acceso múltiple



En el punto marcado como  $t_0$  una estación (cualquier dispositivo para transmisión de señales electrónicas de información conectado a la red) ha finalizado de transmitir su paquete de datos. Un paquete es un grupo de bits con un tamaño máximo fijo y formato que se transmite como un todo. Supongamos que cualquier otra estación tiene un paquete por enviar y podría estar intentándolo en este preciso instante. Si dos o más estaciones deciden transmitir simultáneamente, habrá una colisión. Cada una de ellas detectará la colisión, abortando su transmisión, esperando un periodo de tiempo aleatorio y entonces intentándolo otra vez asumiendo que ninguna otra estación ha iniciado la transmisión en ese tiempo. Esta característica define a Ethernet® y consiste en periodos de transmisión y contención alternantes, con periodos de espera o vacío teniendo lugar cuando las estaciones están en reposo (por ejemplo, sin transmitir). Detallemos ahora el algoritmo de contención. Supongamos que dos estaciones simultáneamente inician la transmisión exactamente en el tiempo  $t_0$ . La longitud del tiempo que toman las estaciones para detectar las colisiones entre los dos mensajes determina que tan largo será el periodo de contención y de allí también podrá inferirse el retardo y la transmisión en la red. El tiempo mínimo para detectar la colisión es el tiempo que toma la señal para propagarse de una estación a la otra. La detección de colisión es un proceso análogo. El hardware de la estación escucha el cable mientras éste está transmitiendo. Si lo que el lee es diferente de lo que está transmitiendo, sabe que una colisión está ocurriendo, (de aquí el nombre de detector de colisión y sensor de

portadora). Para minimizar el retardo, una estrategia aleatoria adaptativa ha sido desarrollada. Esto minimiza el retardo bajo cargas ligeras o bajo tráfico de señales y es estable bajo condiciones de carga pesada o alto número de señales de tráfico. Esto trabaja mediante el proceso siguiente: después de que un paquete ha sido transmitido exitosamente, todas las estaciones podrían competir por el primer espacio de contención. Si existe una colisión, todas las estaciones bajo tal condición establecen un parámetro local ( $L$ ) igual a 2 y seleccionan uno de los próximos  $L$  espacios para retransmisión. Cada vez que esto ocurre una estación se ve involucrada en una colisión, con lo cual duplica su valor de  $L$ . Después de  $K$  colisiones, una fracción de  $2^{-k}$  de las estaciones intentará retransmitir en cada espacio exitoso. Conforme Ethernet® llega a ser cada vez más pesada (mayor tráfico de señales), las estaciones se van adaptando a la carga. Este modelo heurístico (modelo con solución aproximada y útil), es llamado *back-off exponencial binario (retroceso)*. Para examinar el desempeño de Ethernet® supongamos que el tiempo para que una señal se propague entre dos estaciones separadas sea  $\tau$ . En  $t_0$  una estación empieza a transmitir. En  $(\tau - \epsilon)$ , un instante antes de que la señal llegue a una estación más distante, esa estación también empieza a transmitir. Detecta la colisión y casi instantáneamente se detiene pero la pequeña explosión de ruido causada por la colisión no regresa a la estación original hasta que transcurre un tiempo  $(2\tau - \epsilon)$ . De allí, que en el peor de los casos, una estación no puede estar segura que ha clasificado o dimensionado el canal hasta que la señal es transmitida por  $2\tau$  sin escuchar una colisión. Este tiempo es conocido como espacio o ranura (slot). Como un ejemplo, en un cable co-axial de longitud el valor aproximado de  $\tau \sim 5 \mu$  seg. Consideremos Ethernet® bajo condiciones de carga constante y pesada, con  $K$  estaciones siempre listas para transmitir. Si cada estación transmite durante un espacio de contención con probabilidad  $p$ , la probabilidad de que cada una de las otras estaciones no transmita es  $(1 - p)$ ; la probabilidad  $A$ , por lo tanto, de que alguna estación ingrese a la red durante un espacio (slot) es:

$$A = K p (1 - p)(1 - p) \dots (1 - p)$$

$K$  estaciones intentando transmitir      Probabilidad de transmisión de la estación referida      Probabilidad de que cada una de las otras estaciones no esté transmitiendo

para expresarlo en notación exponencial

$$A = K p (1 - p)^{K - 1}$$

Del cálculo diferencial elemental,  $A$  es maximizada cuando

$$(dA/dp) = 0,$$

esto es,

$$(dA/dp) = [(K-1)(1-p)^{K-2} \cdot Kp(-1)] + K(1-p)^{K-1}$$

y

$$p = (1/K)$$

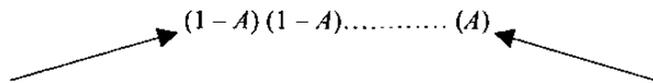
de modo que  $A_{max}$  llega a ser

$$A_{max} = K \cdot (1/K) [1 - (1/K)]^{K-1} = [1 - (1/K)]^{K-1}$$

de forma tal que cuando  $K \rightarrow \infty$ ,  $A \rightarrow 1/e$ , recordando que

$$[1 - (1/n)]^n \rightarrow (1/e) \text{ cuando } n \rightarrow \infty.$$

La probabilidad de que el intervalo de contención tenga exactamente  $j$  espacios (slots) en su configuración (por ejemplo, que la transmisión exitosa ocurra en el  $j$ -ésimo espacio) es



Probabilidad de fracaso para  $j-1$  slots

Probabilidad de éxito en el  $j$  -ésimo slot

o

$$\text{probabilidad de } j \text{ espacios (slots)} = A(1-A)^{j-1},$$

de modo que el número promedio de espacios por contención está dado por

$$\sum_{j=1}^{\infty} j A (1-A)^{j-1} = (1/A),$$

recordemos que

$$x_{\text{promedio}} = \sum_{i=1}^{\infty} i f(i)$$

donde  $i$  = valor de  $x$  así como  $f(i)$  es la probabilidad de  $x$ . El número medio de espacios (slots) es  $(1/A)$  y la longitud de espacio es  $2\tau$  de modo que el intervalo de contención media es

$$W = (2\tau / A).$$

Asumiendo un  $p$  óptimo, el número promedio de slots de contención nunca es mayor que  $e$ , por consecuencia  $W$  tiene como valor máximo

$$2\tau e \cong 5.4 \tau$$

Si el paquete promedio toma  $P$  seg para transmitir, cuando muchas estaciones tienen paquetes por enviar, la

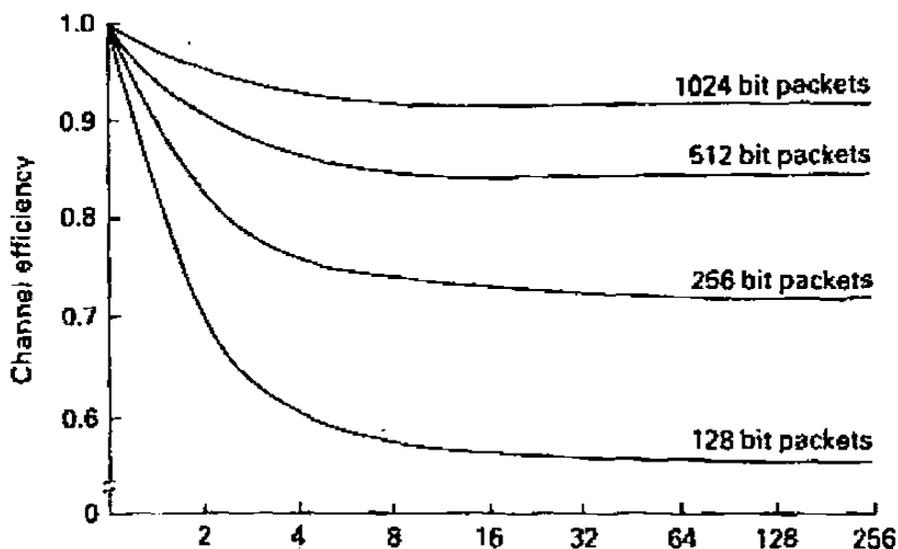
*eficiencia de canal* (la fracción de canal usado útilmente) es

$$\text{eficiencia de canal} = \frac{\text{tiempo para transmisión de paquete}}{\text{tiempo para transmisión de paquete} + \text{intervalo de contención}}$$

$$\text{eficiencia de canal} = \frac{P}{P + 5.4 \tau}$$

Se puede observar que la máxima distancia de cable entre dos estaciones es fundamental para su desempeño, lo que significa que a mayor longitud de cable, mayor el intervalo de contención. De igual forma, se aprecia que el proceso es probabilístico y no determinístico, y, que inclusive, el mensaje podría no ser procesado dentro de un tiempo especificado o con certeza. El desempeño de la red llega a ser menos eficiente cuando se tiene la condición de estado de un gran número de estaciones transmitiendo y mensajes muy cortos como se puede apreciar en la Fig. 6.2.2.

Figura 6.2.2 Desempeño de la red Ethernet®



## **CAPÍTULO 7**

### **EL ESTADO DEL ARTE EN LA MANUFACTURA**

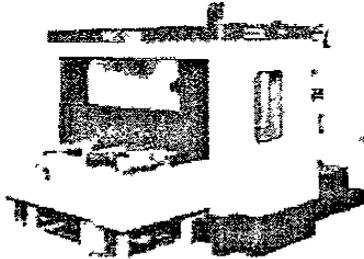
### **7.1 El Estado del Arte de los Recursos de Manufactura en el Ambiente Industrial**

El tema central del presente trabajo es presentar los Sistemas Avanzados de Manufactura, pero estaría incompleto sin una visión de campo de los recursos avanzados que están disponibles en la actualidad. Cada sistema utiliza una combinación de estos recursos para instrumentar y equipar el área de fabricación en el piso de planta. Los equipos disponibles crean un catálogo muy vasto en cualidades, tamaño y costo, sin embargo, su operación está fuera del tema central. Este capítulo no pretende ser un promotor de marcas o compañías y ante la imposibilidad de crear un catálogo propio, por obvias razones de tiempo, costo y confidencialidad se ha preparado un material, que si bien, son equipos fabricados en los países más desarrollados, hemos conservado el crédito a la propiedad intelectual y los derechos reservados (Copyright ©, ®, ™) de uso y propiedad por parte de los propietarios de las marcas así como productos e imágenes utilizadas en este capítulo. Desafortunadamente, muy pocos de estos recursos (máquinas, equipos e instrumentos) son fabricados en México. un argumento que, parece incoherente para un país considerado actualmente la novena potencia económica del mundo. Sin lugar a dudas, estos recursos formarán en las próximas décadas el equipo básico de casi todas las empresas manufactureras mexicanas. para cumplir, con un ciclo más y de probada evidencia histórica del atraso tecnológico que caracteriza a nuestro país. El material se presenta como galería de imágenes, con notas descriptivas del tipo de máquina, según nomenclatura del fabricante y en el idioma comercial. Se ha pretendido mostrar algunos adelantos de la mecánica, eléctrica, electrónica y robótica. En particular se ha hecho énfasis en varios de los recursos descritos en capítulos anteriores como equipos CNC, Centros de Maquinado, Robots de Ensamble, Sistemas de Transporte y Almacenamiento de Materiales, Sensores, Software y Robots Industriales de gran capacidad y variadas aplicaciones.

## Figura 7.1.1 Equipos CNC

## TOSHIBA MACHINE TOOL LINE - UP

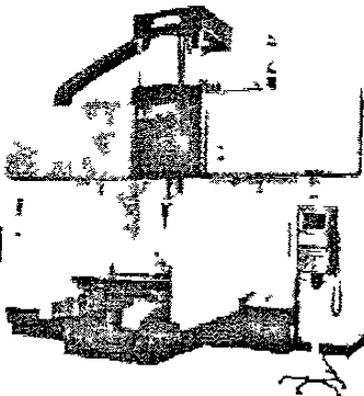
## Horizontal Machining Centers



BMC-800

Axis travel	mm	1,250x1,000x900
X - Y Z	in	49.2x39.4x35.4
Table size	mm	800x800
	in	31.5x31.5
Main motor	kW	22/18.5 (30/22)
	HP	30/25.0 (40/30)
Net weight	kg	18,000
	lbs	39,600

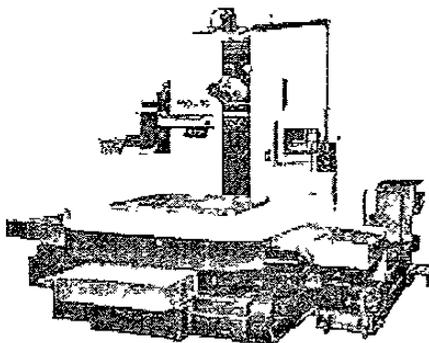
## Double Column Type Machining Centers



MPF-2114C

Distance between columns	mm	2,100
	in	82.7
Table working area	mm	1,800x1,400
	in	70.9x55.1
Max. load on table	kg	10,000
	lbs	22,000
Main motor	kW	26.5/22
	HP	36/30

## Table -Type Horizontal Boring &amp; Milling Machines



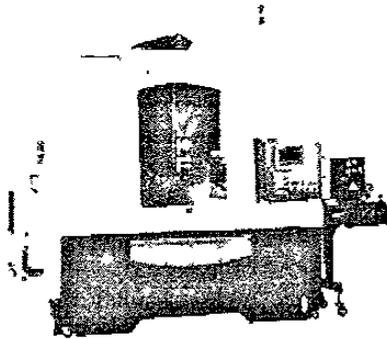
BTD-110.R16

Spindle dia.	mm	110
	in	4.3
Table size	mm	1,400x1,600
	in	55.1x63
Main motor	kW	15/11 (22/18.5, 30/22)
	HP	20/15 (30/25, 40/30)
Net weight	kg	28,000
	lbs	61,600

## Figura 7.1.2 Equipos CNC

### New Machines for 2002

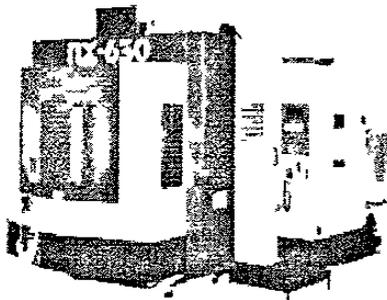
#### Double Column Type Machining Centers



MPF-5

Axis travel	mm	1,050x550x500
X - Y - Z	in	41.3x21.6x19.7
Table size	mm	1200x550
	in	47.2x21.6
Main motor	kW	22/15
	HP	30/20
Net weight	kg	11,500
	lbs	25,350

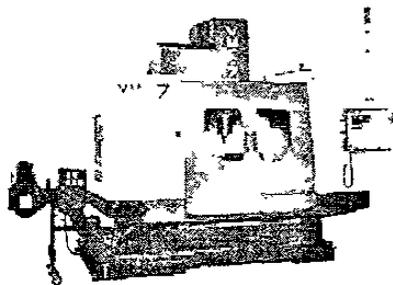
#### Horizontal Machining Centers



NX630

Axis travel	mm	1000x850x850
X - Y - Z	in	39.4x33.5x33.5
Pallet size	mm	630x630
	in	24.8x24.8
Main motor	kW	30/24
	HP	40/30
Net weight	kg	20,500
	lbs	45,200

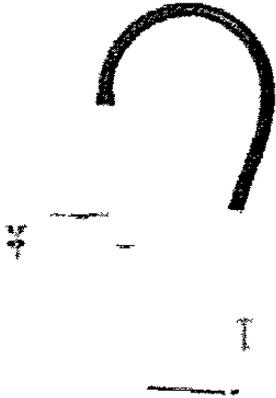
#### Verticle Machining Centers



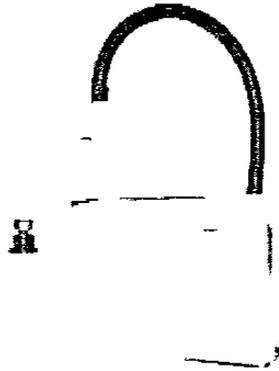
VMC-7

Axis travel	mm	1,300x650x650
X - Y - Z	in	51.2x21.6x21.6
Table size	mm	1400x700
	in	55.1x27.5
Main motor	kW	30/25
	HP	40/34
Net weight	kg	11,500
	lbs	23,100

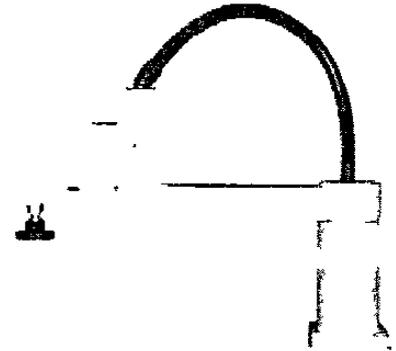
Figura 7.1.3 Robots SCARA



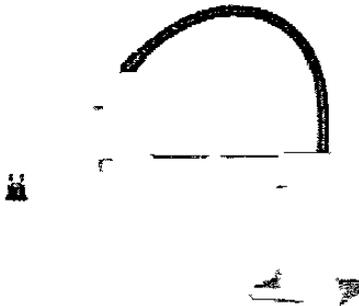
Toshiba SR504HSP Scara Robot



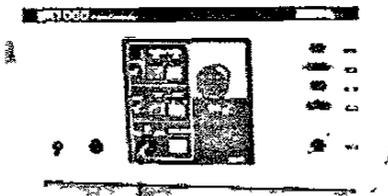
Toshiba SR654HSP Scara Robot



Toshiba Scara Robot SR-854HSP

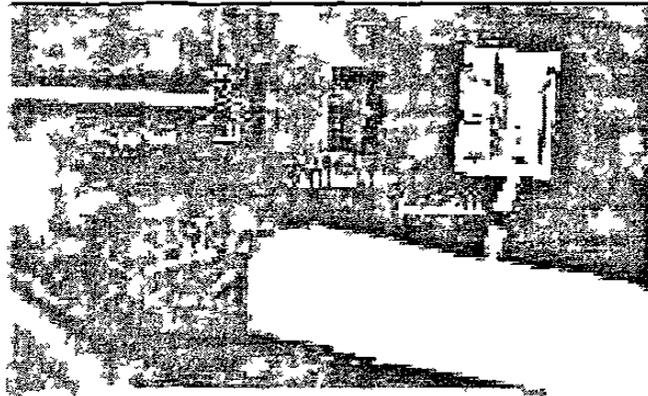


Toshiba SR1054HSP Scara Robot



Toshiba SR7000 Robot Controller

**Figura 7.1.4** Micro-Ingeniería de circuitos electrónicos realizada con equipos SMD (Surface Mounted Devices), puede verse el tamaño logrado al compararlo con un puntal de cerillo.



Engineering Research Report -Copyright © Marco Scussat, Alain Würsch y Reymond Clavel.- Germany

**Figura 7.1.5** Transportadores Planos

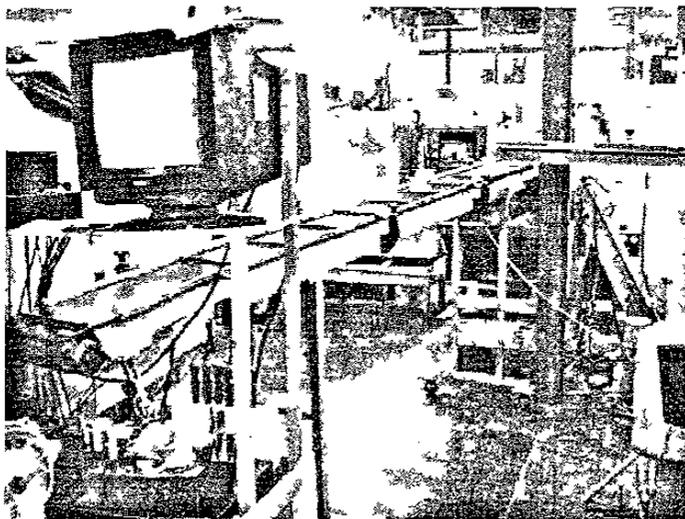
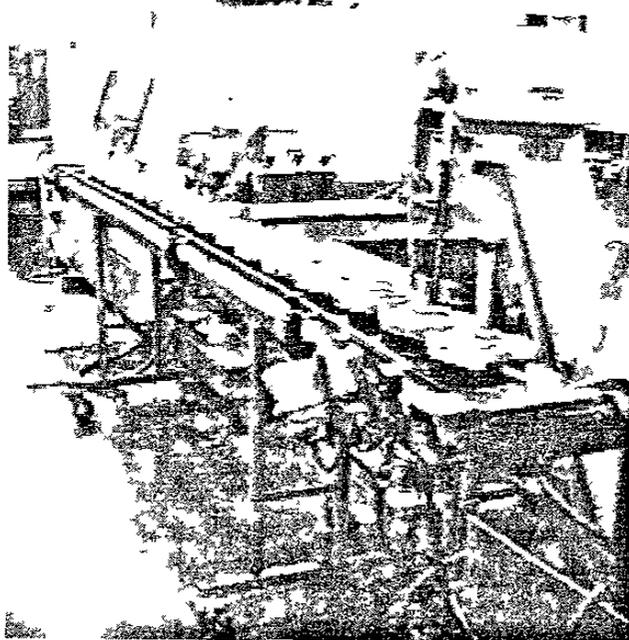
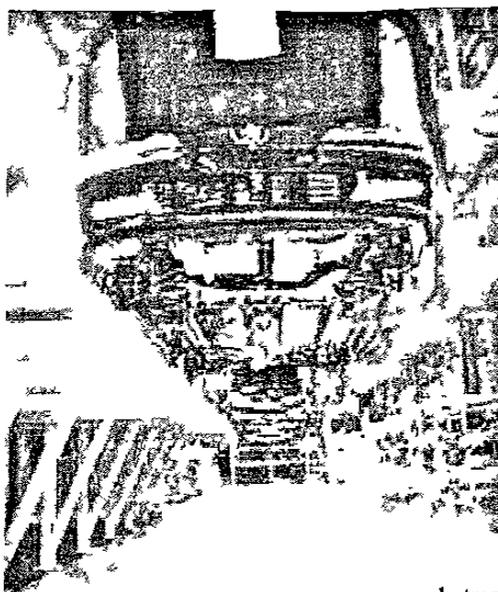


Figura 7.1.6 Transportadores Adaptados



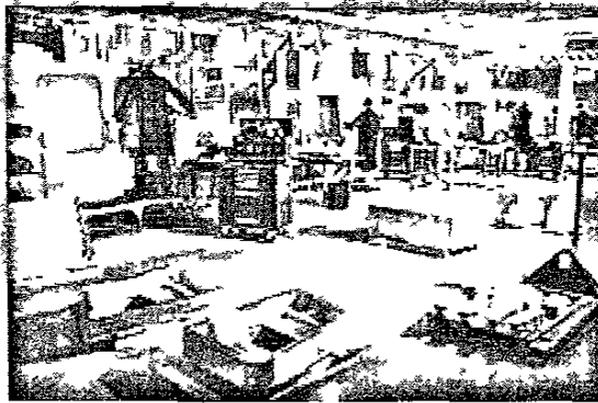
Copyright © Pack Manufacturing Corporation USA

Figura 7.1.7 Transportador de cubierta (Deck Conveyor)



Copyright © Groupe Fives Lille -France conveyor de transporte (automotriz)

Figura 7.1.8. Tecnología de grupo en línea de transferencia con Equipos CNC



Copyright © Brown Precision Inc. - USA

Figura 7.1.9 Sistemas de Almacenamiento (Mini-Load Automated Buffer Systems)

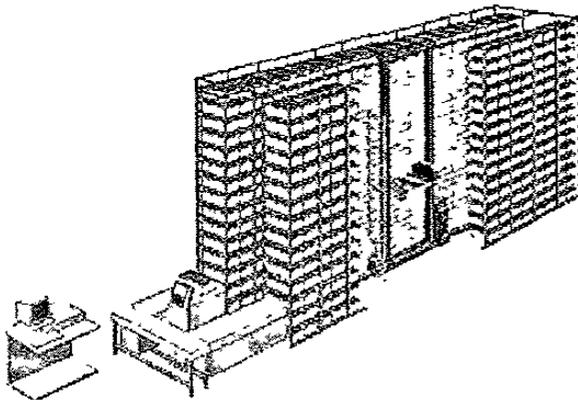
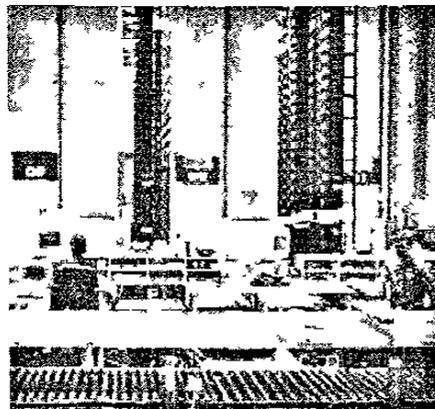
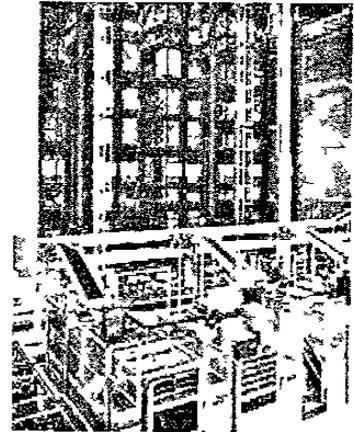
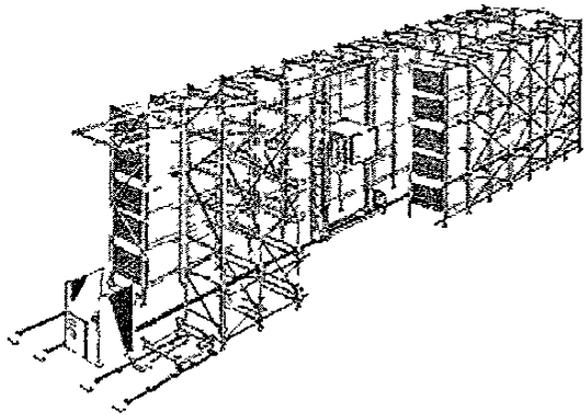
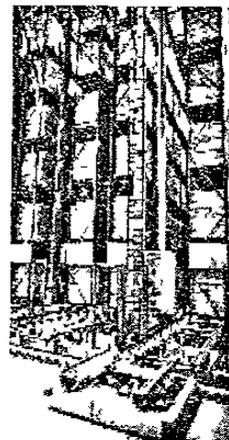
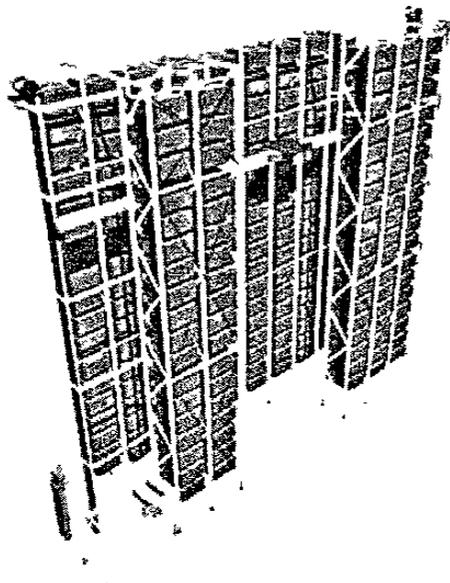


Figura 7.1.10 Sistemas de Carga Unitaria (Unit Load Automated Buffer Systems)

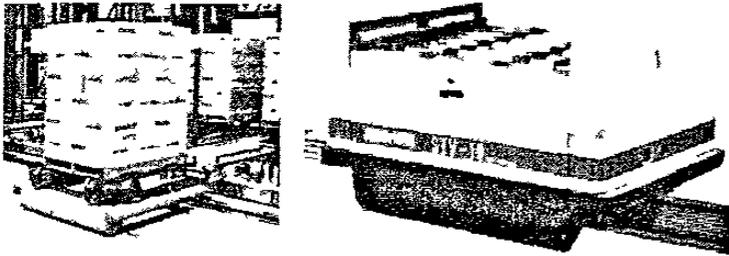


Copyright © 2002 Cisco-Eagle USA

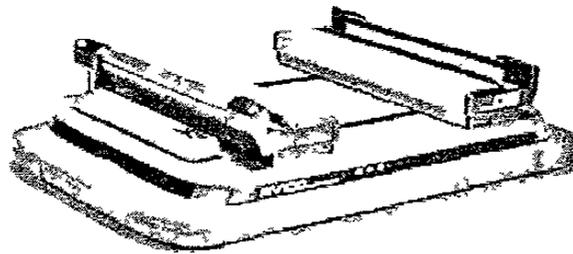
Figura 7.1.11 Sistema de Alta Velocidad (MSS II High Speed Box Buffer)



**Figura 7.1.12 Vehículo de Transferencia- Sorting Transfer Vehicles (STV's)**  
Copyright © 2002 Cisco-Eagle USA



**Figura 7.1.13 Vehículo Guiado-Automated Guided Vehicles (AGV's)**  
Featuring ESKAY's exclusive 10-year battery and 90-degree crabbing



Copyright © 2002 Cisco-Eagle USA

Figura 7.1.14 Sistemas de Transporte Monoriel--Space Carrier Monorail (SCM) Systems

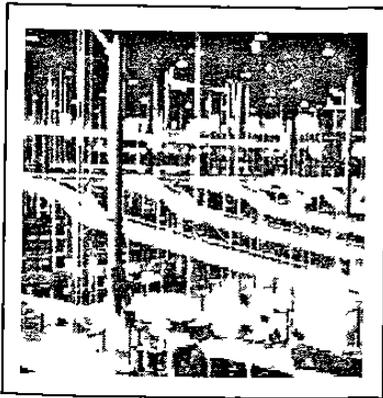
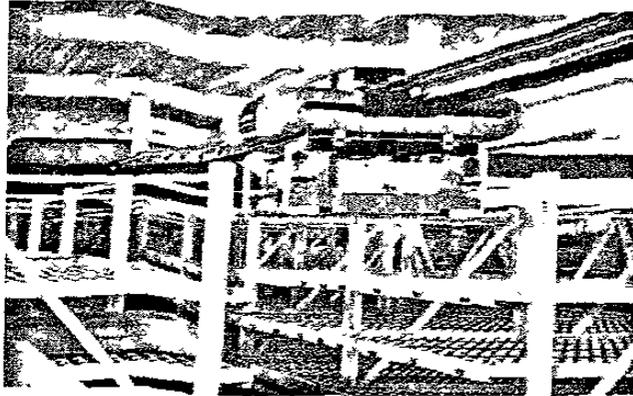
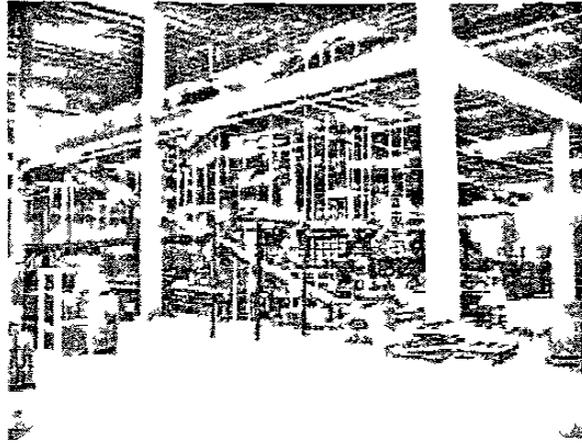


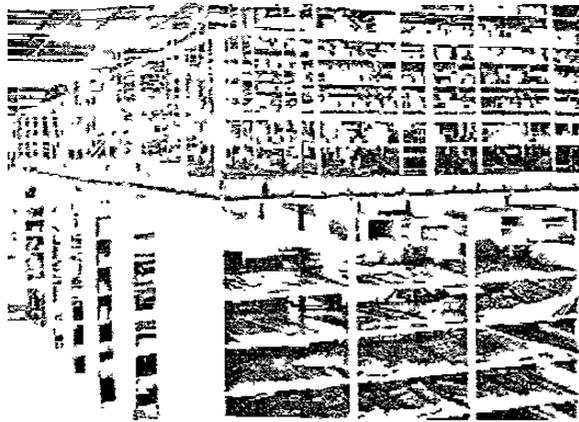
Figura 7.1.15 Manejo de Material (Material Handling)

Figura 7.1.16 Sistemas de Almacenamiento Vertical -- Mezzanines Reclaim Vertical Space



Copyright © 2002 Cisco-Eagle USA

Figura 7.1.17 Almacenadores Especiales- Steel Mezzanine



Copyright © 2002 Cisco-Eagle USA

Figura 7.1.18 Unidades de aplicaciones automotrices, empaque-embarque y soldadura del Lider Mundial en la fabricación de Robots Copyright © G M Fanuc General Motors USA Japón

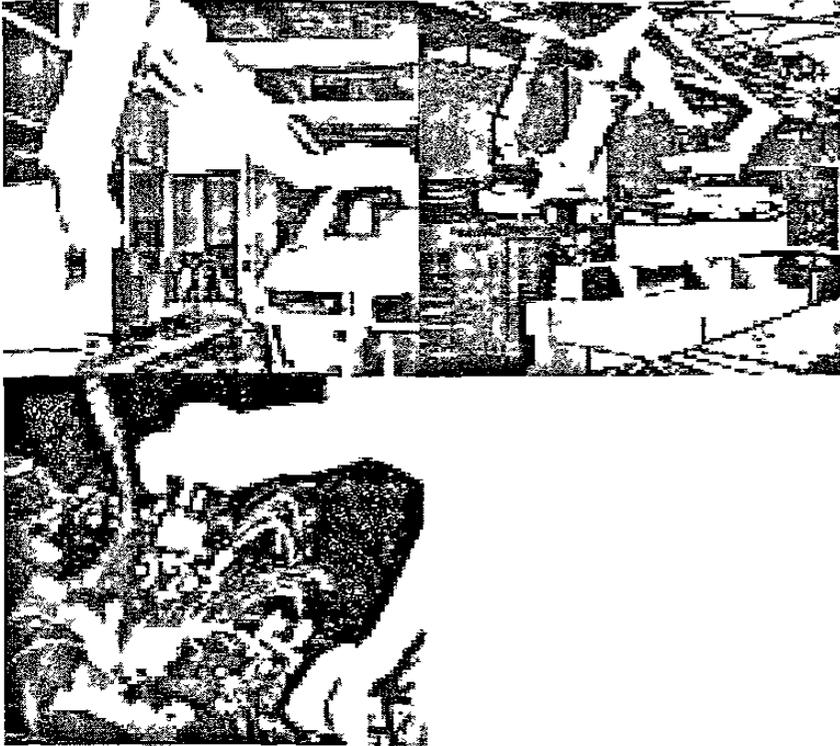
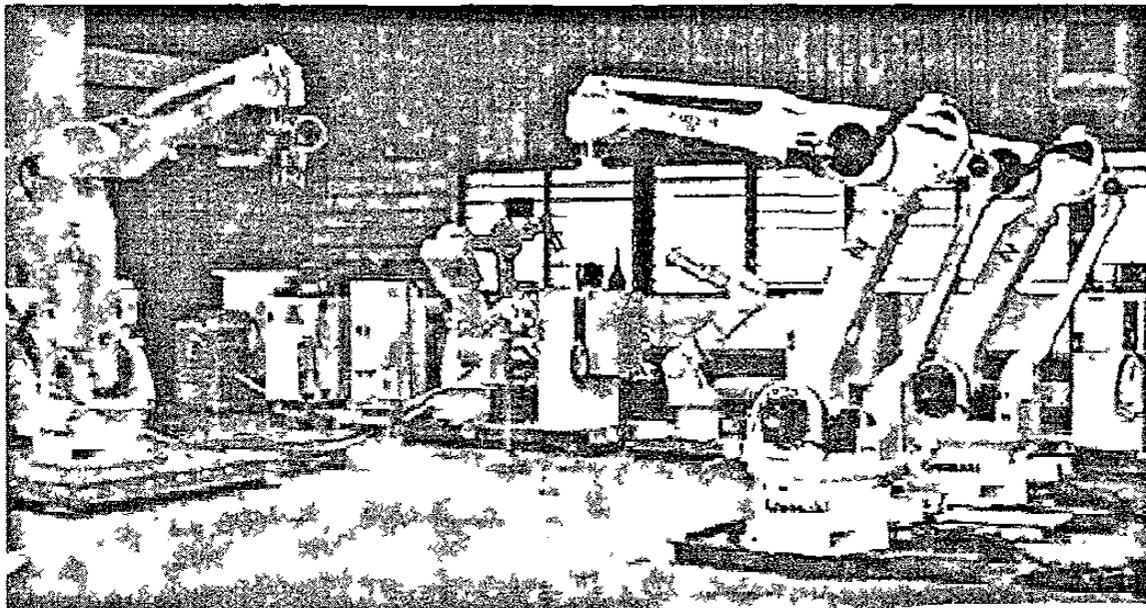


Figura 7.1.19 Robots en patios de espera



Copyright © Toshiba Corporation of America & Rijlaarsdam Factory Automation B.V.-Holland



Figura 7.1.20 Robot en Celda de Manufactura (PINTADO)

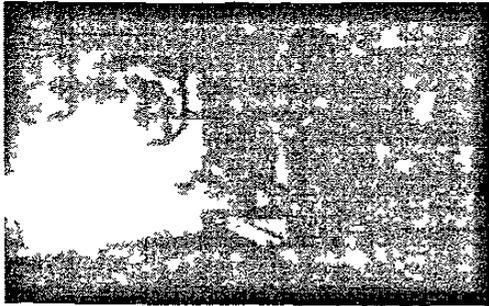


Figura 7.1.21 Robot (RECUBRIMIENTO CON PLASMA)

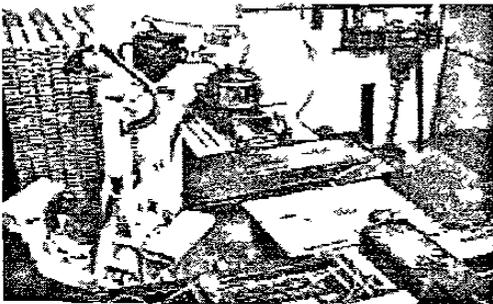


Figura 7.1.22 Robot (CARGANDO LINEA DE PALLETS)

Copyright © Toshiba Corporation of America & Rijlaarsdam Factory Automation B.V.-Holland

Copyright © Toshiba Corporation of America & Rijlaarsdam Factory Automation B.V.-Holland

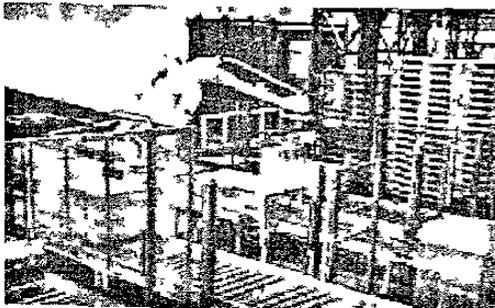


Figura 7.1.23 Robot (PALETIZANDO CAJAS PEQUEÑAS)

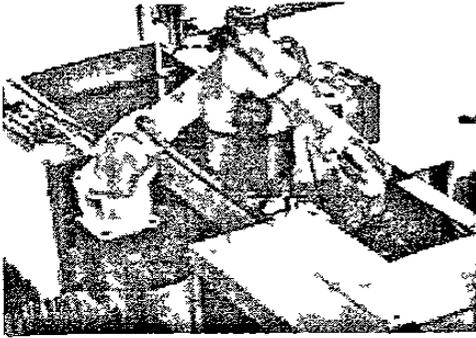


Figura 7.1.24 Robot (INYECCION DE PLASTICO)

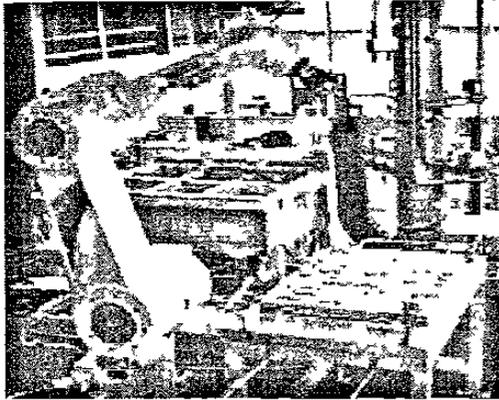


Figura 7.1.25 Robot (LIMPIEZA A VAPOR Y TRATAMIENTO GALVANICO)

Copyright © Toshiba Corporation of America & Rijlaarsdam Factory Automation B.V.-Holland

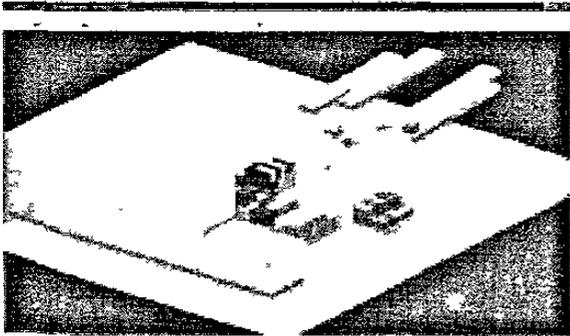


Figura 7.1.26 SOFTWARE DE SIMULACION

Copyright © Toshiba Corporation of America & Rijlaarsdam Factory Automation B.V.-Holland

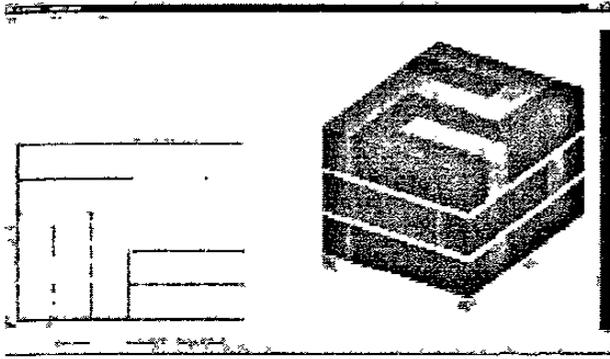
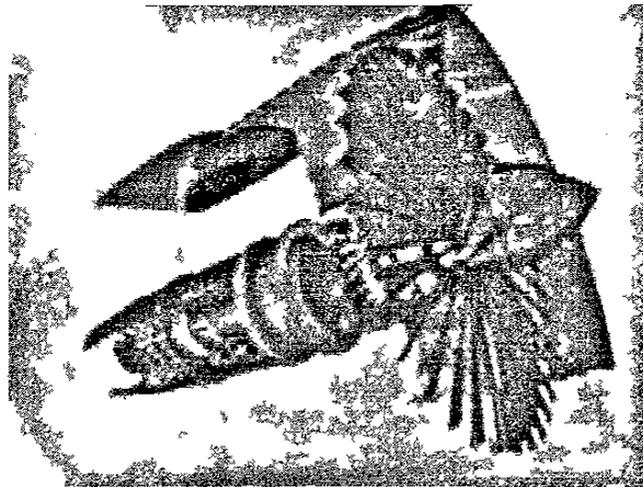


Figura 7.1.27 SOFTWARE PARA PALETIZADO

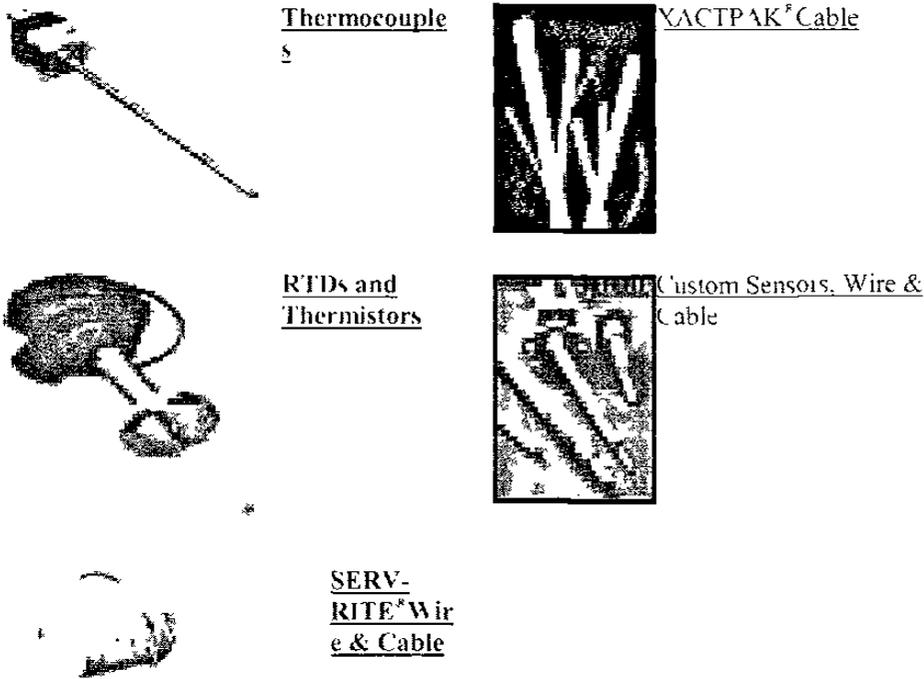
Copyright © Toshiba Corporation of America & Rijlaarsdam Factory Automation B.V.-Holland

Figura 7.1.28 Diseño simulado por computadora en un equipo CAD-CAM

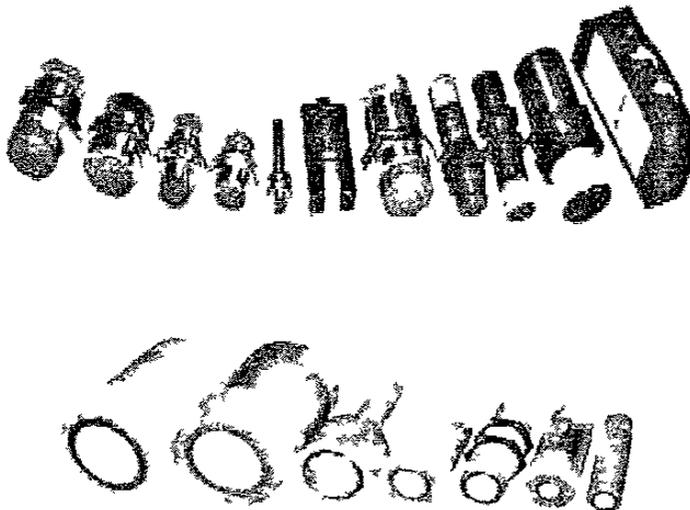


Copyright © Toshiba Corporation of America & Rijlaarsdam Factory Automation B.V.-Holland

**Figura 7.1.29** Sensores para diversas aplicaciones  
 Copyright © Watlow Electric Manufacturing Company - USA



**Figura 7.1.30** Sensores--Copyright © EMS-Engineering Manufacturing Services- USA



- Ultrasonic
- Proximity
- Optical
- Capacitive
- Inductive
- Float

**CAPÍTULO 8**

**CASOS DE APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS AVANZADOS DE MANUFACTURA**

El presente capítulo muestra casos específicos de aplicación de los Sistemas Avanzados de Manufactura. El primer caso exhibe una síntesis de aplicación de los principios de los Sistemas de Manufactura Flexible (FMS). A causa de la confidencialidad del proyecto sólo se mencionarán aspectos claves y relevantes del trabajo original, desarrollado en la empresa consultora con base en el estado de Sonora. Por razones antes mencionadas, serán omitidas fotografías y gráficas para mantener derechos de la propiedad intelectual. Sin embargo, fue permitido el uso de datos y diagramas.

### **8.1 Caso de aplicación del Sistema de Manufactura Flexible: FMS**

#### OBJETIVO:

Diseñar un sistema de manufactura flexible para fabricar, en prueba piloto, los siguientes ensambles

1. Tarjeta Electrónica TE X34
2. Flecha Torneada (maquinada) MS AII
3. Bisagra HINGE –PR- 0196

y comparar indicadores de desempeño basados en tres criterios:

1. Tiempo de procesado
2. Calidad de producto
3. Inventario en proceso.

#### ARREGLO DEL SISTEMA

Para la selección del arreglo del FMS fueron requeridas simulaciones computacionales de configuración con el propósito de optimizar espacio y verificar las características críticas del equipo necesario para realizar las operaciones de ensamble de los productos antes mencionados TE X34, MS-AII y HINGE PR-196. De estos resultados los ingenieros consultores tomaron la decisión de elegir el Sistema Integral AMATROL. Este equipo posee características de economía, confiabilidad y mínimo requerimiento de espacio. Aunado a las características necesitadas, posee también un manejo sobresaliente sobre las condiciones de forma, tamaño y peso cuando se consideraron los ensambles a prueba en el estudio. También basados en el estudio previo de planeación y simulación se decidió optar por máquinas y equipos de uso general para permitir un alto grado de flexibilidad. Enseguida se lista el equipo utilizado y en la columna izquierda el nivel de control (control jerárquico):

- |   |                                                                                                                                       |
|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Controlador Central AMATROL <sup>®</sup>                                                                                              |
| 2 | Controlador del Transportador                                                                                                         |
| 3 | Controlador de celda ROBOT PUMA <sup>®</sup> MARK II 560/ UNIMATION <sup>®</sup><br>PUMA: Programation Universal Machina for Assembly |
| 4 | Centro de Maquinado Vertical VMC 535 - KRYLE <sup>®</sup>                                                                             |
| 4 | Torno KL 2000 - KRYLE <sup>®</sup>                                                                                                    |
| 3 | Controlador de Celda ROBOT MOVEMASTER EX MITSUBISHI <sup>®</sup>                                                                      |
| 4 | Gauge                                                                                                                                 |
| 3 | Controlador de Celda ROBOT JUPITER <sup>®</sup> XL                                                                                    |
| 4 | Dispositivos Auxiliares                                                                                                               |
| 3 | Controlador de Celda ROBOT MOVEMASTER EX MITSUBISHI <sup>®</sup>                                                                      |
| 4 | Sistema de Visión 866 VS                                                                                                              |

Un diagrama con vista de planta de la distribución del FMS instalado se muestra en la **Figura. 8.1.1.**

El FMS instalado puede considerarse tipo ciclo y de flujo aleatorio, en virtud de que permite procesar de manera simultánea piezas completamente diferentes y con distintas secuencias de procesado. Es posible procesar familias de partes o grupos tecnológicos como:

1. Operaciones de maquinado (torno y centro de maquinado vertical)
2. Operaciones de montaje o ensamble
3. Operaciones de ensambles verticales de precisión
4. Operaciones combinadas maquinado-montaje-ensamble.

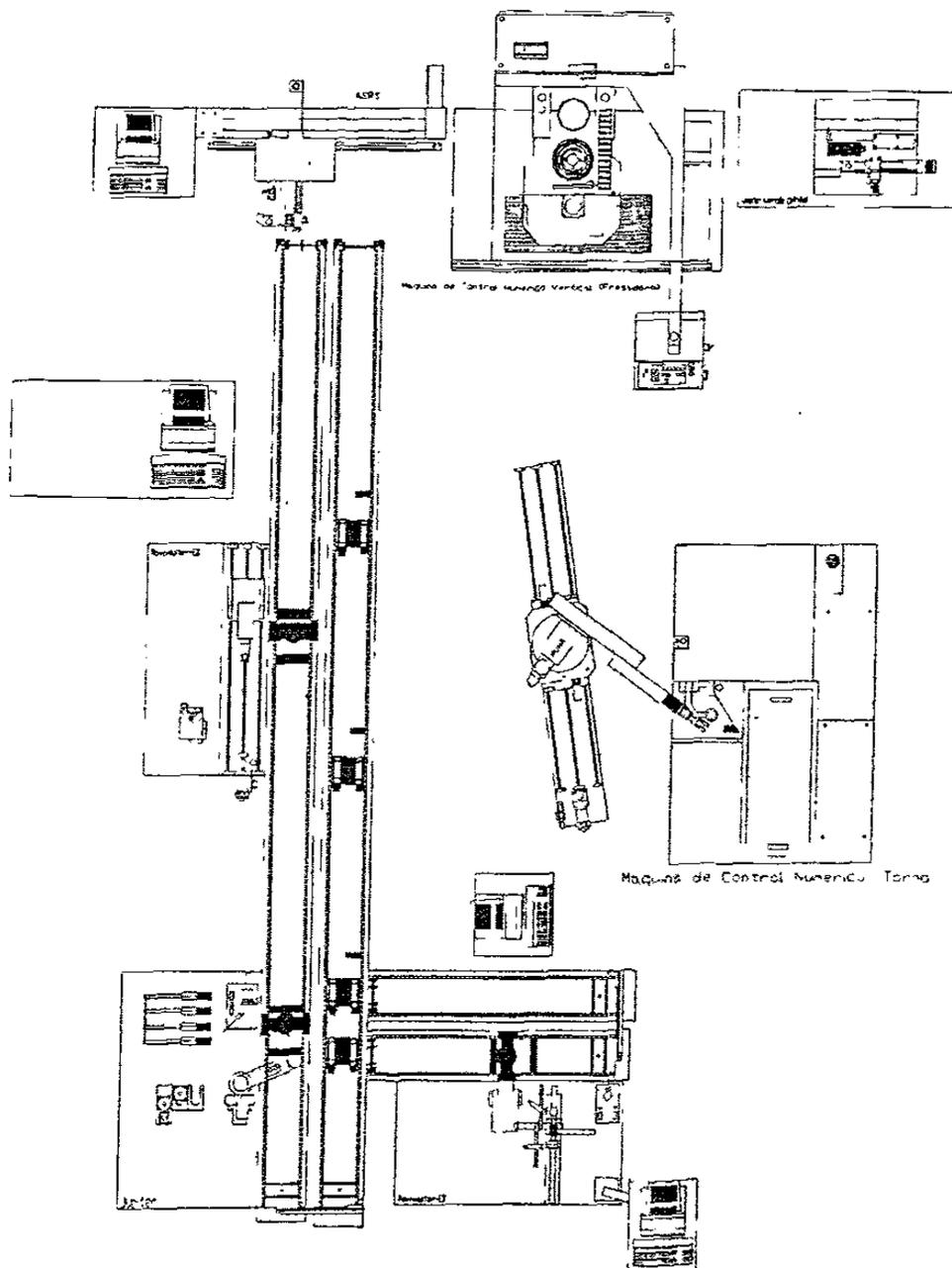
El sistema FMS tiene como límites de operación para piezas o partes de ensambles 4 kg de peso total en cada pieza y volumen espacial máximo de 7 pulg x 7 pulg x 5 pulg. Los pallets (arreglos para transportar las partes o ensambles) fluyen en una sola dirección, lo que limita la secuencia del procesado, pero fue realizado por economía y para resultados de primera prueba. Con ello se buscaba minimizar el impacto de costo de la prueba y refinar la selección definitiva en gran escala. El FMS tiene un sistema de control computarizado para coordinar las operaciones. La computadora central se enfoca a dirigir el sistema para que produzca físicamente las partes solicitadas en el programa de producción. Esta computadora central utiliza el software AMNET<sup>®</sup>, el cual sincroniza las operaciones del piso de manufactura en base a la disponibilidad del equipo, de manera similar al funcionamiento de un sistema Kanban. Es decir, no alimenta materia prima al sistema FMS mientras no se tenga disponible el equipo requerido para procesarla, lo que obviamente optimiza el flujo

del proceso evitando cuellos de botella en el circuito del FMS: la estrategia de producción es similar a los sistemas de demanda variable aleatoria.

El FMS en cuestión, cuenta con dos equipos fundamentales de operación:

- a. Banda Transportadora o Conveyor
- b. Sistema automatizado de carga y descarga AMATROL® Modelo 863 AS / RS

Figura 8.1.1 Distribución de recursos del FMS



El manejo de materiales o partes, desde el almacén a las estaciones de trabajo donde se realiza el maquinado o ensamblado, se logra con un sistema transportador tipo banda, que en este caso, fue instalado formando un lazo o ciclo. Las piezas que se procesan en el FMS deben estar colocadas en un dispositivo denominado pallets para facilitar su manejo. Los pallets están diseñados para acoplarse a la banda transportadora. El sistema FMS cuenta con seis estaciones, cada una con funciones y equipo como se muestra a continuación:

LOCACION	TIPO	RECURSOS
Estación 1	P	Recepción de materiales provenientes del almacén AS RS
Estación 2	T	Operaciones de maquinado (VMC) y Robot PUMA®
Estación 3	T	Torneado (Torno KRYLE®)
Estación 4	T	Ensamblajes verticales de precisión, Robot tipo SCARA- JUPITER XL®
Estación 5	P	Medición (gauge), Robot de brazo articulado MITSUBISHI® Movemaster EX
Estación 6	P	Ensamble de piezas y sistema de visión AMATROL®, Robot de brazo articulado MITSUBISHI® Movemaster EX

P:positioner, T:transfer

Se requirió el diseño de accesorios para los pallets (arreglos transportadores de piezas), lo cual permitió mayor fluidez en la operación de las partes, manteniéndolas fijas en el recorrido, a su vez, esto facilitó las operaciones de carga y descarga de los robots. A cada pallet se le asigna un código de barras para identificación. La banda transportadora se mueve a velocidad constante mientras el FMS está operando, permitiendo el flujo de partes o materiales en una sola dirección desde/hacia el almacén. Por la parte externa de la banda transportadora existen las seis estaciones de trabajo que cuentan con un mecanismo para el manejo de los pallets. Dependiendo del tipo de mecanismo que posean las estaciones se clasifican en dos tipos: estación transferidora o “transfer” y estación posicionadora o “positioner”. Las estaciones 1, 2, 3, y 5 son del tipo transfer, es decir, cuando un pallet debe llegar a alguna de estas estaciones, el pallet es retirado del transportador para no entorpecer el flujo de otros pallets con diferente destino. Las estaciones 4 y 6 son del tipo “positioner”, lo que significa que los pallets que deben llegar a estas estaciones son detenidos y fijados sobre la línea del transportador. En este caso aunque no se detiene el transportador, sí se bloquea temporalmente el paso de otros pallets al llegar a este punto. Por lo general, los mecanismos tipo “transfer” se emplean en las estaciones donde el tiempo de proceso es mayor para evitar cuellos de botella y mantener el flujo de partes y materiales que tienen otros destinos durante el proceso, permitiendo así disminuir tiempos de ciclo de manufactura e incrementando la productividad de los sistemas FMS. Al configurar el proceso, se

definió la trayectoria para cada pallet y en el código de barra asignado, los sensores monitorean el curso de posición en la trayectoria, para verificar el flujo planeado y de acuerdo a los tiempos requeridos; de no ocurrir el estado esperado, se envía una señal desplegada en la pantalla de la computadora central.

### SOFTWARE

La operación sin error del FMS requirió del diseño de 18 programas de cómputo, mismos que consistieron en 8 programas de tarea y 10 subrutinas del Robot Puma. Los programas realizados se listan a continuación en la

**Tabla 8.1.1**

**Tabla 8.1.1** Subrutinas de programación de robots

MABFRE	FRE3(s)	TOR4(s)
MAMBIT	FRE4(s)	MABVIS
MAPUMA	IRTORNO(s)	MAFTOR
IRFRESA(s)	TOR1(s)	MATSUP
FRE1(s)	TOR2(s)	MATVIS
FRE2(s)	TOR3(s)	MARA (AS/RS)

(s):subrutina

### RESULTADOS

Fueron corridas 16 pruebas de simulación y el equipo de expertos decidió trabajar el sistema FMS con una escala de producción máxima de 24 piezas y de 8 unidades de cada uno de los productos en el estudio: tarjeta, flecha y bisagra. De los resultados de simulación se procedió a seleccionar las corridas más prometedoras para verificarlas en la práctica o evento real. Los resultados de la simulación fueron comprobados a través de las corridas de prueba, por lo que se validaron los datos de la **Tabla 8.1.2**. En virtud de las combinaciones posibles puede elegirse, para obtener 8 unidades de cada una de las partes a procesar, 8 corridas de 3 unidades cada una, 2 corridas de 12 unidades ó 3 corridas de 8 unidades ó bien una sola corrida de 24 unidades. De acuerdo a los resultados obtenidos en la simulación, el tiempo promedio de producción por ensamble disminuye a nivel individual si se realizan corridas por lotes de cada uno de los productos a producir. Sin embargo, desde un punto de vista más integrado, el tiempo total para responder a la orden de producción sería muy elevado en comparación con otras opciones, siendo muy baja la utilización de la capacidad productiva del sistema. Por lo que definitivamente no sería lo más adecuado para optimizar el funcionamiento del sistema. Por el contrario, las corridas de producción de mezclas de productos, ofrecen el tiempo de respuesta menor y la mayor utilización del sistema, conforme lo afirman Stecke y Solberg (1981); aunque puede notarse

que aumenta ligeramente el inventario en proceso. Si comparamos los resultados de los dos procesos alternos considerados para ensamblar la bisagra, es posible notar que no existe diferencia significativa en cuanto al tiempo medio de ensamble ni tampoco en relación a la duración de la corrida de producción o al inventario en proceso. En este caso particular, el proceso alterno no ofrece mayor beneficio, ya que esta operación no puede considerarse como crítica; pero, si la operación tuviera una duración mayor sería notable el beneficio al considerar el proceso alterno, porque la estación 5 está equipada con un sistema del tipo “transfer”, mientras que la estación 6 tiene un sistema tipo “positioner” que obstruye el flujo de los pallets, afectando con esta característica la duración de la corrida de producción y el inventario en proceso. Si nos enfocamos a analizar la utilización del sistema, se puede observar que el mayor porcentaje no alcanza el 50%. En ocasiones, puede resultar preocupante el bajo porcentaje de utilización del FMS (Flexible Manufacturing System), sin embargo, se debe considerar que este factor depende en gran medida de las características del diseño con las cuales fue creado el sistema en particular. Según la clasificación de FMS que propone Fischer (1991), este sistema corresponde a uno de tipo aleatorio los cuales ofrecen un alto grado de flexibilidad a costa de subutilizar el equipo instalado.

Tabla 8.1.2 Resultados de simulación

Partes Pro/Corr			Prioridad asign.			Tiempo Prom.	Utilización del	Duración Prom.	Inventario en
1	2	3	1	2	3	de ensamble seg	FMS (%)	Corrida (min)	Proceso
1	1	1	1	1	1	490	29	8.1	1
1	1	1	3	2	1	490	29	8.1	1
1	1	1	2	3	1	490	29	8.1	1
1	1	1	1	2	3	490	29	8.1	1
4	4	4	1	1	1	360	39.33	24	<2
4	4	4	3	2	1	360	39.33	24	<2
4	4	4	2	3	1	360	39.33	24	<2
8	0	0	1			293.75	14.33	39.1	1
0	8	0		1		232.5	15.33	15.33	1
0	0	8			1	330	19.5	19.5	1
8	8	8	1	1	3	335	42	44.4	<2
8	8	8	3	3	1	335	42	44.4	<2
8	8	8	1	1	1	335	42	44.4	<2
8	8	8*	1	1	1	336.22	42.5	44.5	<2
4	4	4*	1	1	1	360	39.83	24	<2
1	1	1*	1	1	1	500	28.66	8.2	1

\* se utilizó el Robot Mitsubishi instalado en la Estación 5, en lugar del Robot instalado en la Estación 6.

Pro/Corr.: Procesadas/Corrida; asign.: asignada

### CONCLUSIONES

Con el fin de efectuar un análisis comparativo entre el FMS diseñado para la prueba y los sistemas de producción actuales en la compañía que ordenó el estudio, se eligieron 3 criterios: tiempo de ciclo de proceso, calidad de producto e inventario en proceso. Los resultados obtenidos y los argumentos correspondientes aparecen a continuación (ver **Tabla 8.1.3**)

Tabla 8.1.3 Criterios comparativos entre un FMS y otros sistemas

Producto	Tiempo de procesado*		Calidad		Inventario en proceso	
	(minutos)		% defectuosos		Unidades/piezas	
	FMS	Otro	FMS	Otro	FMS	Otro
Sistema de Manufactura						
Bisagra	5.58	47.3	0	32	>1	1
Flecha	1.72	18.4	0	28	>1	1
Tarjeta Electrónica	3.08	0.47	0	2	>1	20

Tiempo de procesamiento. El tiempo de procesamiento para la bisagra y la flecha es significativamente menor cuando se utiliza el FMS en comparación con los procesos manuales de la compañía. En el caso de la tarjeta electrónica, el tiempo de ensamble es significativamente menor con el proceso manual, esto se debe a que el robot necesita cambiar de efector para cada parte que ensambla.

*Nota del autor de esta tesis:* concuerda con lo que afirma M. Groover (1987), al analizar los beneficios económicos cuando se emplea equipo de control numérico. El caso de la tarjeta coincide con el argumento de D.J. Williams (1988) cuando establece que los robots no son siempre capaces de realizar tareas demasiado simples para los humanos, a causa de que la mano humana es un multi-efector de una sola pieza.

Inventario en proceso. El inventario en proceso tanto de la flecha como de la bisagra es unitario en el caso del proceso manual y en el FMS resulta cercano a un valor de 2. Para la tarjeta electrónica, por el contrario, es bastante mayor cuando se emplea el proceso manual ya que se utiliza un sistema de producción por lotes. Así en la línea de ensambles se tienen 20 unidades en proceso en cualquier momento, mientras que el FMS tiene 2 unidades en proceso.

Calidad de producto terminado. La calidad del producto terminado es definitivamente mayor para todos los que se producen en el sistema FMS. Tanto la flecha torneada como la bisagra maquinada en el VMC (Centro de Maquinado Vertical) cumplieron las especificaciones, particularmente en dimensiones y acabados de las superficies maquinadas, además, el desperdicio es prácticamente nulo; en cambio, cuando se utiliza un proceso manual, los productos defectuosos se suman al retrabajo para impactar el costo de la operación. En el ensamble de la tarjeta electrónica, también puede notarse la disminución a cero de los errores al ensamblar las partes, así como también la cantidad de partes dañadas al insertarlas equivocadamente.

### RECOMENDACIONES FINALES

La compañía consultora incluyó 6 elementos a considerar en el caso de que el solicitante de la investigación decidiera aprobar el proyecto a gran escala de producción. Estos elementos se describen brevemente a continuación:

**Capacitación.** Aunque el grado de automatización sea muy avanzado, ningún sistema de manufactura funciona por sí mismo, se requiere necesariamente de la intervención de personas. Es fundamental que el personal con responsabilidades y funciones en el sistema conozca a fondo las características, ventajas, desventajas y limitaciones del FMS. Saber operar el sistema FMS es un requisito necesario, más no suficiente.

En particular, el personal de ingeniería deberá conocer aspectos de planeación y diseño de manufactura, lógica de programación, técnicas estadísticas y criterios de análisis para la toma de decisiones. Sin lo anterior será sumamente difícil la optimización o mejor aprovechamiento de los recursos de manufactura.

**Aplicación del sistema.** La flexibilidad tiene también sus limitaciones, por esa razón es importante saber con claridad que familia de partes se pueden procesar en el FMS bajo estudio o aplicación. Evaluar la utilización y si esta resuelve un problema en lugar de agudizarlo. La aplicación de los FMS es muy clara: producción de bajos volúmenes con alta variedad.

**Planeación.** Es muy poco lo que se puede lograr sin una planeación dedicada y realista. La optimización del FMS depende en gran medida de los análisis de simulación o modelos matemáticos del sistema. Sin embargo, siempre es preferible un enfoque práctico de pruebas, cuando se carezca de recursos humanos preparados en aspectos matemáticos de nivel de ingeniería. Deben conocerse y fijarse los criterios de prioridad para la optimización.

**Corridas de producción de mezcla de productos.** Al aplicar el modelo propuesto en la fabricación de productos específicos se requiere que el FMS sea diseñado para reducir el tiempo de ciclo e incrementar al máximo posible el porcentaje de utilización de la capacidad instalada. Es decir, un FMS no está intentado para producción por lotes exclusivamente, porque al permitirlo se pierde la principal ventaja de estos sistemas de manufactura.

**Calidad uniforme.** La calidad obtenida en los prototipos de prueba será la misma que los productos finales porque al mantenerse la operación del sistema en sus parámetros, se reproduce la precisión de ensamble. Una modificación al sistema obliga a la verificación de calidad en los prototipos de prueba o primera pieza producida.

**Enfoque sistémico.** Es fundamental considerar que la optimización del sistema abarca todos los equipos y máquinas, optimizar una operación aislada no garantiza la optimización del FMS. La optimización local crea cuellos de botella en general a la operación. Estos son los principios del Dr. Goldratt (Teoría de restricciones) aplicada a los sistemas productivos.

*Nota del autor de esta tesis:*

(La teoría de restricciones establece que la optimización de una operación de un sistema productivo puede generar cuellos de botella en la siguiente operación del sistema y al eliminarla aparecerá otro en la siguiente

operación y así ocurrirá sucesivamente. La única forma de eliminarlos es analizar la optimización total del sistema para identificar el **cuello de botella del sistema**).

## **8.2 Caso de aplicación del Sistema de Manufactura Esbelta**

En el presente tema se tratará la aplicación de los principios de la Manufactura Esbelta. El caso que nos ocupa corresponde a una empresa con oficina y planta matriz en los Estados Unidos de América y con planta filial en el área metropolitana de Monterrey, N.L. En el proyecto a describir se pretende efectuar un cambio en el sistema tradicional de producción en las nuevas plantas a operar en la región de Norteamérica.

Tradicionalmente la línea de producción fue el bastión principal de la manufactura en este grupo empresarial fabricante de partes para la industria automotriz mundial. El equipo directivo USA-México se reunió para decidir el tipo de sistema de manufactura a establecer en la nueva planta con operaciones en la zona metropolitana de Monterrey cuyo objetivo sería abastecer, como proveedor mundial en una familia específica de productos, a la industria automotriz. La inversión del Proyecto LM (Lean Manufacturing) rebasó los **250 millones de dólares** norteamericanos. Se planteó como directriz estratégica mejorar y superar todos los indicadores de calidad, costo y tiempo de ciclo de las operaciones de la planta matriz y de todas las plantas filiales en los Estados Unidos de América. Debido a la estricta confidencialidad del proyecto sólo se permitió incluir en esta tesis aspectos generales.

### **OBJETIVO**

Establecer, operar y optimizar un sistema de Manufactura Esbelta en la planta de nueva creación en la zona metropolitana de Monterrey para obtener el mejor nivel de indicadores de costo, calidad y tiempo de ciclo de todas las plantas de producción del grupo a nivel mundial.

### **DESARROLLO DEL PROYECTO**

El documento final del proyecto es muy extenso por lo que el enfoque de la descripción apuntará sólo los aspectos técnicos y de ingeniería. Se eligió el Sistema de Manufactura Esbelta para cambiar el sistema de producción por lotes de tamaño medio y alta variedad a uno con producción continua de alta variedad. Al carecer de técnicas propias o únicas de aplicación, este Sistema de Manufactura Esbelta fue diseñado teniendo como bases el estudio de Womack-Jones-Roos del Massachusetts Institute of Technology (1985), una visita a Japón para conocer el estado del arte, la contratación de Consultores Expertos de Estados Unidos y

bibliografía miscelánea, como artículos del tema en revistas de divulgación, libros de texto y reportes periodísticos alrededor del mundo. Un primer punto a destacar del Proyecto LM (Lean Manufacturing) es un análisis comparativo bastante amplio de las características, ventajas y desventajas de los sistemas de manufactura tradicional y esbelta. El Proyecto LM se perfiló hacia un enfoque auto-comparativo y consistió en contrastar los resultados de la mejor planta en los Estados Unidos (Planta Base) y los resultados de prueba de operaciones preliminares o pilotos en la Planta Nueva. Se dará una breve explicación acerca de las Plantas Base y Nueva. La Planta Base se distingue por su sistema de producción por lotes produciendo bajos volúmenes de una gran variedad de productos. Esto obedece a que se labora con órdenes de trabajo únicas de pequeñas cantidades, órdenes de trabajo pequeñas y repetidas en lugar de hacerlo con órdenes de mayor cantidad. El procedimiento de la Planta Base reside en acumular órdenes de trabajo de diferentes clientes del mismo producto y producirlas en un gran lote. La distribución de maquinaria se encuentra en una sola área y el manejo de lotes de materiales es irregular e intensivo en todo el piso de planta y con tiempos de espera demasiados prolongados. La ventaja en esta planta estriba en la flexibilidad a los cambios pero sacrifica calidad y productividad, sobre todo si se le compara con una línea de producción. La alta variedad impacta en la curva de aprendizaje afectando la calidad del producto. El tiempo de ciclo se incrementa como resultado de los tiempos invertidos en la preparación de máquinas. La Planta Nueva es un proyecto de inversión donde se pretende crear un Sistema de Manufactura Esbelta para fabricar variedad de producto en volúmenes medios o bajos. A diferencia de la producción por lotes el nuevo sistema de manufactura se diseñó para fabricar una secuencia mezclada de productos. Una línea de ensamble tradicional no puede operar en dicha forma debido a que los productos son de gran variedad y de bajo volumen. El nuevo sistema fue proyectado para fabricar una mezcla en tipo y volúmenes de producto en una línea de producción, con el propósito de reducir costos en comparación con la producción por lotes. Hubo necesidad de considerar un sistema de cambio máquina-herramental para minimizar tiempo de ciclo, aumentar la flexibilidad e incrementar la calidad y la productividad.

### **METODOLOGIA DEL PROYECTO**

El equipo gerencial y directivo del consorcio estuvo plenamente conciente de la difícil transición de producción por lotes a manufactura esbelta, por la razón de que no existe un método definido y probado para planear y ejecutar el cambio. La decisión lógica consistió en aprovechar, como referencia, la metodología

exitosa de compañías de manufactura alrededor del mundo las cuáles llevaron a cabo transiciones similares. Se dará un breve resumen de la extensa información del Proyecto LM en este tema. Las actividades reflejan el procedimiento aplicado, hasta completar un plan con guías de acción. Esta sección del proyecto resultó ser la más extensa por lo que en interés de la brevedad, únicamente será presentado un esquema general. En las siguientes tablas de información, por razones obvias, los indicadores utilizados y los valores comparativos entre Planta Base y Planta Nueva se omiten así como los detalles descriptivos y de profundidad de cada paso de la metodología.

#### **A. Lluvia de ideas**

Primera etapa del proyecto ejecutivo. Se efectuó una reunión con el personal ejecutivo, operativo y operario claves para generar, en base a la experiencia, las ideas más creativas para realizar la transición a la Manufactura Esbelta. Fueron generadas 66 ideas, listándose a continuación una muestra con reproducción fiel y exacta al texto original:

- I-1 Identificar y eliminar operaciones que no den valor agregado
- I-2 Redistribuir la planta
- I-4 Eliminar transporte de sub-ensambles
- I-7 Disminuir las fallas del equipo
- I-11 Desarrollar operarios multi-habilidades
- I-14 Instalar dispositivos a prueba de error (poka-yoke)
- I-23 Disponer material en punto de uso
- I-24 Eliminar almacenamiento centralizado de materiales
- I-25 Encontrar el cuello de botella y alinear el resto del proceso
- I-27 Hacer eventos Kaizen para disminuir tiempos
- I-38 Simplificar los diseños para que sean fáciles de fabricar
- I-43 Eliminar tiempos de espera y colas en el proceso
- I-51 Utilizar computadoras en el piso (CAD/CAM)
- I-53 Hacer mantenimiento predictivo a las máquinas
- I-60 Determinar buffers (almacenes temporales) para no interrumpir el ciclo de producción
- I-61 Buscar fabricar en tamaños de lote uno (one-piece-flow: flujo de una pieza)

I-65 Asignar varias máquinas a un solo operario

I-66 Evaluar la flexibilidad de respuesta de los proveedores.

**B. Agrupación por afinidad.** Fue realizada la estratificación mediante el método de celda, considerando que una idea podía situarse en más de una celda. La **tabla 8.2.1**, muestra el ejercicio.

**Tabla 8.2.1** Agrupación por afinidad

	DIAGNOSTICO	PLANEACION Y DISEÑO	MEJORA CONTINUA
TECNOLOGIA E INSTALACIONES	1, 9, 52, 54, 55 etc.	2, 3, 10, 13, 18, etc.	5, 6, 7, 14, 27, 29, etc.
RECURSOS HUMANOS	x, y, z, ...	x, y, z, ...	x, y, z, ...
ESTRUCTURA Y CONTROL ORGANIZACIONAL	30, 55, etc.	x, y, z, ...	x, y, z, ...
ABASTECIMIENTO Y FLUJO DE MATERIALES	x, y, z, ...	x, y, z, ...	27, 32, 36, 37, 46, 47, etc.
PROGRAMACION DE PRODUCCION	54,55, etc.	16, 17, 21, 25, 28, etc.	x, y, z, ...

**C. Modelo Conceptual.** Las etapas A y B están contenidas en el modelo conceptual generado por los Consultores participantes en este proyecto. Se puede apreciar el modelo planteado por Womack-Jones.

**Tabla 8.2.2** Modelo operativo de Manufactura Esbelta

I.Definir valor	II.Identificar la cadena de valor	III.Definir el flujo	IV.Jalar	V.Perfección
1.Concientización	2.Diagnóstico del Sistema actual  3.Planeación del cambio	4.Diseño de la configuración de planta  5.Diseño del flujo de materiales  6.Diseño del sistema de trabajo	7.Arranque del nuevo sistema  8.Ejecución del cambio	9.Mejora continua del sistema

**D. Modelo operativo.** Se procedió a definir el proyecto con objetivos específicos para las fases de la tabla 8.2.2., como aparece a continuación.

- I-1** Establecer el compromiso gerencial para rediseñar el sistema de manufactura después de un análisis competitivo y de los riesgos asociados. Formar el equipo de implementación y establecer un plan de trabajo general.
- II-2** Seleccionar una familia de producto piloto, identificar la cadena de valor agregado en el sistema de producción y evaluar objetivamente el desempeño de los indicadores clave y la madurez del sistema de producción en uso.
- II-3** Formación y entrenamiento del equipo de implementación, establecimiento de metas y definición del programa de trabajo.
- III-4** Identificación de celdas de manufactura, rutas de los materiales y los controles de procesos asociados para prevenir defectos.
- III-5** Diseño del sistema de programación de producción e identificación de los puntos de uso y cantidades requeridas de materiales.
- III-6** Definición de roles y habilidades requeridos en el personal y la documentación necesaria para efectuar las operaciones de los procesos.
- IV-7** Entrenar al personal en el nuevo sistema, iniciar actividades de orden y limpieza, **SMED<sup>1</sup> Y TPM<sup>2</sup>**.
- IV-8** Redistribución de la planta y materiales. Evaluación de la mejora en indicadores.
- V-9** Diseñar el sistema de mejora continua de los procesos de producción, extrapolar los beneficios obtenidos a otras familias de productos y anticipar fluctuaciones en la demanda.

<sup>1</sup>Single Minute Exchange of Dies, <sup>2</sup>Total Productivity Maintenance

**E. Actividades específicas.** Se preparó una tabla 8.2.3 con las fases y etapas incluyendo las técnicas a utilizar la cuál se presenta a continuación:

Tabla 8.2.3 Técnicas utilizadas en Manufactura Esbelta

Fase	Etapa:	Técnicas utilizadas
I. Definir valor	<p><b><u>1. Concientización</u></b>  Análisis competitivo.  Evaluación del riesgo debido al cambio.  Decisión de cambio.  Formación y entrenamiento del equipo de implementación.</p>	Análisis competitivo, Análisis de riesgo, Toma de decisiones.
II. Identificación de la cadena de valor	<p><b><u>2. Dignóstico del sistema actual</u></b>  Selección de familia de producto piloto.  Identificación de flujo y valor agregado.  Revisión de indicadores de desempeño.  Evaluación de la madurez del sistema de producción</p> <p><b><u>3. Planeación del cambio</u></b>  Determinación de metas de indicadores.  Selección del nuevo sistema: celdas o línea mixta.  Definición de programa de trabajo: actividades, tiempos y recursos.</p>	<p>Matriz producto-máquina, Diagrama de flujo. Análisis de valor agregado, Efectividad global del equipo, Indicador de la madurez del sistema de producción.</p> <p>Fijación de objetivos, Toma de decisiones, Gráfico de Gantt.</p>
III. Definir el flujo	<p><b><u>4. Diseño de la configuración de planta</u></b>  Determinación del ciclo de producción ponderado: ritmo.  Análisis de tiempo de operación.  Identificación de restricciones.  Definición del nuevo layout: celdas de manufactura.  AMEF's y Planes de Control.</p>	Cálculo del ritmo de producción, Análisis de tiempos y movimientos, Teoría de restricciones, Diseño de layouts, AMEF's, Planes de Control, poka-yoke, Control estadístico de proceso (CEP).
<b>Fase</b>	<b>Etapa:</b>	<b>Técnicas utilizadas</b>
	<p><b><u>5. Diseño del flujo de materiales</u></b>  Definición de puntos de uso del</p>	Abastecimiento de materiales al punto de uso, Sistema Kanban.

III. Definir el flujo	<p>material: lugar tipo y cantidad.</p> <p>Actividades de flujo continuo de una pieza.</p> <p>Determinación de señales Kanban.</p> <p>Identificación de recursos para manejo de materiales.</p> <p>Programación de la mezcla de producción.</p> <p><b><u>6. Diseño del sistema de trabajo</u></b></p> <p>Definición de roles, habilidades y plan de carrera: entrenamiento cruzado.</p> <p>Determinación de estándares y cargas de trabajo.</p> <p>Desarrollo de instrucciones de operación y ayudas visuales.</p> <p>Funciones organizacionales de soporte.</p>	<p>Flujo continuo de una pieza, Programación de la programación</p> <p>Entrenamiento cruzado, Balanceo de líneas, Documentación de procesos.</p>
IV. Jalar	<p><b><u>7. Arranque del nuevo sistema</u></b></p> <p><b><u>8. Ejecución del cambio</u></b></p>	<p>Entrenamiento en el trabajo, 5S's, SMED, TPM.</p> <p>Evento Kaikaku (Redistribución de planta).</p>
V. Perfección	<p><b><u>9. Mejora continua del sistema</u></b></p>	<p>Acciones correctivas y preventivas, Sistema de sugerencias y reconocimientos, Formación de Equipos de Mejora, Control Visual, Estandarización.</p>
<b>Fase</b>	<b>Etapa</b>	<b>Técnicas utilizadas</b>

Una comparación de indicadores entre la Planta Existente (Zona Metropolitana de Monterrey) y la Planta Nueva con el Sistema de Manufactura Esbelta ofrece una visión de conjunto y sobre todo, permite conocer los resultados de la aplicación de una metodología, que se ha convertido en paso obligado a mejores prácticas de fabricación. La siguiente **tabla 8.2.4** es un resumen ilustrativo para evaluar, la efectividad del Sistema de Manufactura Esbelta, siguiendo un método probado en los países más industrializados del mundo.

Tabla 8.2.4 Resultados comparativos entre Planta Base vs Planta Nueva

Indicador	Planta BASE (USA)	Planta NUEVA
Tiempo de paro de máquina por descompostura o falta de materiales	15 %	3%
Tiempo de preparación de máquina por cambio de modelo	30%	5%
Retrabajo en producto final	95%	<20%
Tiempos muertos	15%	3%
Tiempo de traslado en el ciclo total	20%	4%
Desperdicio en valor total de materiales	2%	1%
Personal de retrabajo	>30 personas	6 personas
Inspectores de proceso y calidad	>80 personas	10 personas
Tiempo de reparación	4 horas / unidad	2 horas / unidad
Tiempo de respuesta al cliente	6 meses	3 meses
Entregas a tiempo del producto	<20 %	95%
Promedio de inventario por pieza	30 días	10 días
Almacenes y puntos de uso	10	100
Modo de producción	Grandes lotes de un modelo	Lotes de tamaño 1/ secuencial

Existe otro conjunto de indicadores de costo así como los indicadores de mejora operativa basados en el modelo de elementos determinantes de negocio de Karlsson-Ahlstrom (1996). Sin embargo, por obvias razones de confidencialidad, no se permitió utilizar la información referida.

### 8.3 Caso de Aplicación del Sistema de Manufactura de Clase Mundial - Seis Sigma

La escasa aplicación de las técnicas avanzadas del Sistema de Manufactura de Clase Mundial- Six Sigma en México, desde el punto de vista del autor del presente trabajo, tiene como origen el débil conocimiento de las técnicas estadístico-matemáticas tradicionales en la cartera de prácticas de los ingenieros mexicanos. Sumado a la percepción anterior, está la evidente desconfianza de la alta gerencia y de los niveles directivos de las empresas mexicanas a los métodos que involucren aspectos puramente científicos o especialidades matemáticas. En general, desde la experiencia del autor de esta tesis, los ejecutivos se sienten más cómodos con trivialidades que pueden entender, siendo presas fáciles de posibles charlatanes o peor aún, de

improvisados con altos rangos que suelen llevar a severas crisis financieras a las empresas. El rechazo se da, hacia la ciencia y la alta ingeniería, la mayor de las veces, despreciando involuntariamente la solución permanente a sus problemas de diseño, manufactura y calidad. Actualmente las empresas mexicanas muestran poco interés en utilizar sistemas avanzados de manufactura. Quizá sea el hecho ineludible de saber, que existen empresas cuya aplicación del six sigma no ha registrado resultados sobresalientes. Estas empresas llegan incluso a cancelar sus programas six sigma al no obtener resultados publicitados en cursos, seminarios y talleres. Es de sobrado interés, escuchar a directivos de empresa asombrarse de que los niveles de calidad en la manufactura prometidos por el Sistema de Manufactura de Clase Mundial Six Sigma (SS) alcancen niveles de defectos en diseño, manufactura y calidad menores al 1%, esto es 10,000 partes por millón (ppm). Pero más importante aún, es señalar que quienes encabezan *comercialmente* la oferta de consultoría en esta materia, **no utilizan técnicas estadístico-matemáticas**. De allí que, el impacto en reducción de niveles de defectos en el diseño, manufactura y calidad de productos sean muy pobres, del orden de 10, 20, 50 ó 100 por ciento. Es decir, razones máximas de mejora de 2:1. Existe un ambiente de frustración al respecto de SS en la industria mexicana, basta observar la oferta de empleo reiterada en los medios escritos, para advertir la enorme necesidad de recursos humanos con conocimientos y habilidades en SS. Por esta razón, para precisar la aplicación de los métodos y logros del SS se acude a las fuentes originales. Se presenta a continuación un caso real practicado por el **Dr. Dorian Shainin** y el **Dr. Keki Bhote, creadores del Sistema de Manufactura de Clase Mundial- Six Sigma**. El motivo para incluir este caso en la presente tesis, es la falta de casos exitosos y a la vez didácticos en nuestro país. El caso de estudio a continuación es un caso real del portafolio de éxitos del Dr. Bhote aplicando técnicas tradicionales de Estadística Matemática en la industria electrónica de los Estados Unidos. Se transcribirá una parte del documento original. Por razones obvias, la traducción es libre y fue realizada por el autor de esta tesis. Se omite, por brevedad, la introducción descriptiva sobre el tema de factoriales completos lo cuál es posible consultar en la extensa literatura disponible sobre Estadística-Matemática y Diseño de Experimentos para diseño, manufactura y calidad.

### **PROYECTO**

Reducir los niveles de defectos en el proceso de manufactura de ensamble de componentes en tarjeta electrónica y unión con soldadura de onda.

### PROCESO DE MANUFACTURA

El propósito del proceso de soldadura de onda es la unión soldada de componentes electrónicos. Previo a este proceso, los componentes son insertados mediante máquinas en una tarjeta de circuito impreso. El ensamble es puesto sobre un transportador de banda y pasado primero, a través de una cámara de precalentamiento y posteriormente dando una aplicación de flux, un agente limpiador químico que remueve el óxido del componente y de las guías de la tarjeta de circuito impreso. Finalmente el ensamble pasa sobre una fuente u onda de soldadura fundida en un ángulo de inclinación a una temperatura predeterminada y a una velocidad predeterminada para efectuar conexiones soldadas entre los componentes y la tarjeta.

### DISEÑO DEL PRODUCTO

La etapa del diseño del producto fue realizada de acuerdo a un programa del cliente mismo que proveyó las características de diseño de los componentes y de la tarjeta.

### CONDICIONES DE MANUFACTURA

El ensamble de la tarjeta con el proceso de soldadura de onda de acuerdo a los diseñadores e ingenieros de la compañía, debe mantener como variables de proceso controladas las siguientes cantidades (tabla 8.3.1):

Tabla 8.3.1 Variables de proceso (factores)

Símbolo	Factor	Nivel de operación objetivo
A	Flux	A19
B	Velocidad de banda	4 pies/min
C	Angulo de inclinación	5°
D	Temperatura de precalentamiento	160° F

### CALIDAD DE PRODUCTO

Por varios años la razón de defectos del 3% del número total de conexiones fue tolerado y considerado el mejor proceso que podría lograrse en la manufactura del producto. En indicadores modernos esta razón de defectos se traduce en 30,000 partes por millón.

### METODOS DE SOLUCION Y RESULTADOS

Para competir contra los métodos tradicionales de Shainin-Bhote un equipo de los mejores y expertos ingenieros de diseño, manufactura y calidad de la compañía realizaron varios estudios profundos e innovaciones en el diseño de la tarjeta de circuito impreso. También mejoraron la soldabilidad en la tarjeta de circuito impreso y las guías de componentes. Las mejoras introducidas en el rediseño del producto dieron como resultado una reducción de 30,000 ppm a sólo 10,000 ppm. El equipo de expertos concluyó mediante reporte enviado a la vicepresidencia de manufactura de la compañía que una mejora adicional sería insignificante y a un costo muy alto. Reportaron también que la insignificante mejora podría obtenerse en el proceso de soldadura de onda. Después de la entrega del reporte, en forma separada el Dr. Bhote aplicó estudios de **Análisis Multi-Vari®**, indicando grandes variaciones dentro de la tarjeta, en lugar de variaciones tarjeta-a-tarjeta o variaciones de tiempo-a-tiempo. Posteriormente encontró cuatro factores que podían ser la causa de los niveles de defectos de 10,000 ppm. Revisó las gráficas y detectó que cuando interactuaban valores mayores que los valores objetivos, el nivel de defectos en ese lapso de tiempo disminuía. Por lo que confirmó que los valores superiores a los valores objetivos daban clara muestra empírica de ser una mejor selección de operación del proceso. Posteriormente utilizó los factores con el nivel de operación como nivel bajo (-) y los valores sugeridos por el **Análisis Multi-Vari®** como nivel alto (+). *(Nota del autor de esta tesis: la simbología no garantiza que el nivel (+) sea mejor, la información de mejor nivel de los factores y su combinación de niveles con mejor respuesta o nivel de salida se obtiene posterior al experimento factorial completo 2<sup>4</sup>)*. La **tabla 8.3.2** con los datos del experimento factorial completo 2<sup>4</sup> se muestra a continuación:

**Tabla 8.3.2** Datos de experimento factorial completo 2<sup>4</sup>

Símbolo	Factor	Nivel de operación objetivo (-)	Nivel de operación experimental (+)
A	Flux	A19	A880
B	Velocidad de banda	4 pies/min	6 pies min
C	Angulo de inclinación	5°	7°
D	Temperatura de precalentamiento	160° F	220° F

El Dr. Bhote seleccionó un agente antioxidante con mejores características de remoción de óxido y un incremento en las restantes variable (factores experimentales), velocidad de banda, ángulo de inclinación y temperatura de precalentamiento. El experimento factorial completo 2<sup>4</sup> consistió en seleccionar dos niveles

de prueba (+) y (-) en cada factor, es decir, 16 posibles combinaciones de los niveles. Se realizaron dos tratamientos experimentales para cada combinación. La selección de la variable de salida fue el número de defectos de unión en las tarjetas de circuito impreso. Se efectuaron 32 tratamientos, 16 corridas de prueba y 16 corridas de réplica, ambas fueron realizadas mediante selección aleatoria. *(Nota del autor de esta tesis: la aplicación de criterios de selección aleatoria en el orden de ejecución de los tratamientos, se requiere para evitar sesgos en el experimento y dar oportunidad para que todas las condiciones inherentes o asociadas al experimento estén presentes o ausentes bajo la misma probabilidad de ocurrencia en todos los tratamientos. Se desea evitar condiciones preferenciales que distorsionen los resultados en la variable de salida).* Los resultados del experimento y algunas notas explicativas se encuentran en la **tabla 8.3.3** y en la **tabla 8.3.4**. El caso de estudio original es muy extenso por su didáctica, por lo que para efectos ilustrativos sólo se presenta una síntesis.

Tabla 8.3.3 Resultados de experimentos

	A- (B-)	A- (B+)	A+ (B-)	A+ (B+)
C- (D-)	1 - - - - 21 19 17	3 - + - - 14 15 16	2 + - - - 104 106 112	4 + + - - 8 8 8
C- (D+)	9 - - - + 17 16 15	11 - + - + 64 61 58	10 + - - + 1 1 1	12 + + - + 0 0 0
C+ (D-)	5 - - + - 4 4 4	7 - + + - 43 45 47	6 + - + - 44 41 38	8 + + + - 3 3 3
C+ (D+)	13 - - + + 32 33 34	15 - + + + 14 13 12	14 + - + + 10 10 10	16 + + + + 0 0 0

Datos en celda experimental típica:

7 - + + -
43
45
47

Explicación de contenido en celdas de la **Tabla 8.3.3**

7	Número de celda experimental
- + + -	Combinación de niveles de los factores
43	(Valor de la variable o atributo de salida) Número de defectos en la primera prueba experimental
47	(Valor de la variable o atributo de salida) Número de defectos en la segunda prueba experimental
45	Valor promedio de las salidas en las pruebas experimentales

Tabla 8.3.4 Resultados de Análisis de Varianza-ANOVA)

CELDA #	FACTORES				INTERACCION 2 FACTORES					INT 3 FACTORES				1 4 F.	SALIDA O RESPUESTA	
	A	B	C	D	AB	AC	BC	AD	BD	CD	ABC	ABD	ACD	BCD		ABCD
1	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	19
2	+	-	-	-	-	-	+	-	+	+	+	+	+	-	-	108
3	-	+	-	-	-	+	-	+	-	+	+	+	-	+	-	15
4	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+	8
5	-	-	+	-	+	-	-	+	+	-	+	-	+	+	-	4
6	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	41
7	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	+	45
8	+	+	+	-	+	+	+	-	-	-	+	-	-	-	-	3
9	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	16
10	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	1
11	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	61
12	+	+	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	-	0
13	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+	33
14	+	-	+	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	10
15	-	+	+	+	-	-	+	-	+	+	-	-	-	+	-	13
16	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0
**	-35	-87	-79	-109	-211	-47	+33	-189	+115	+35	+73	+139	+127	-181	+39	

\*\* Esta es la contribución cuantitativa de los efectos principales e interacciones de los factores. Se obtiene utilizando los resultados de la variable de salida con el signo algebraico correspondiente a la columna en cuestión y realizando la suma algebraica de todos los elementos en la columna.

#### Valores críticos e identificación de factores que contribuyen a la variación en la salida

- 211: en el lenguaje de Shainin-Bhote esta es la variable **Red X<sup>®</sup>** responsable de la mayor variación en la salida (Flux + Velocidad, interacción de dos factores).
- 189: en el lenguaje de Shainin-Bhote esta es la variable **Pink X<sup>®</sup>** responsable de la segunda mayor contribución a la variación en la salida (Flux + Pre calentamiento, interacción de dos factores).

Los valores de las contribuciones a la variación, en la variable de salida o respuesta de los factores principales, comparado con la contribución de las interacciones, no son de nivel significativo. Los valores de contribución muestran dos resultados donde el experimento **no** produjo defectos. Siendo el resultado deseado, el cuestionamiento a resolver es, ¿Cuál debe ser la mejor elección en el nivel de los factores, la celda número 12 o la celda número 16?. La discusión y los argumentos estadísticos matemáticos son muy precisos, pero en razón de la brevedad no se presentarán en esta tesis. Para el novato en la aplicación de los métodos la elección

obvia sería una cualquiera de las dos celdas que producen cero defectos. Sin embargo, seleccionar la celda 12 sería una elección sub-óptima. Aquí se requiere conocimiento estadístico para los análisis avanzados del **Shainin System®** de los efectos de interacción de factores, mediante gráficos de interacción, superficies de respuesta, análisis de gradiente y modelación matemática así como corridas de simulación. En contraste, los métodos gráficos de **Shainin-Bhote®** son sencillos y poderosos, porque basta realizar operaciones algebraicas con los resultados de la matriz de experimentos (**Tabla 8.3.2**) y efectuar graficación para elegir los niveles (+) ó (-) de los factores que provoquen el mínimo de perturbación (incremento súbito de defectos) en la respuesta o variable de salida. **La elección óptima son los niveles (+) de cada uno de los factores A, B, C y D.** Todos lo gráficos de interacción incluidos en el caso de estudio, mostraron mayor estabilidad o robustez en el nivel (+), de allí la elección de la celda 16. Se realizó una corrida de confirmación (confirmation experiment) sobre 70 (setenta) tarjetas electrónicas de circuito impreso y sólo se produjeron 3 (tres) defectos en las conexiones de unión soldada. Con 800 (ochocientas) conexiones por tarjeta la razón de defectos llegó a ser 220 (doscientos veinte) ppm. **Esto representó una mejora en la calidad de la manufactura y diseño de 45:1.** El experimento sirvió para modificar 12 (doce) procesos similares de soldadura de onda. El experimento permitió también eliminar del piso de planta 20 (veinte) operadores y 20 (veinte) inspectores, lo que significó un ahorro anual de \$750,000 dólares norteamericanos (un equivalente aproximado de \$7 500 000 m.n.). Los operarios e inspectores fueron reubicados a puestos de trabajo con mayor valor agregado. Esta es la clase espectacular de resultados para resolver problemas de diseño, manufactura y calidad. Este mismo experimento fue realizado en otras compañías japonesas y norteamericanas con operaciones en los Estados Unidos mediante el método Taguchi y el método clásico de factoriales fraccionados, obteniendo resultados de mejora de 2:1 y de 0.5:1 respectivamente, nada comparable con los resultados del **Shainin System®**.

#### **8.4 Caso de Aplicación del Sistema de Manufactura Integrada por Computadora**

El presente caso es un resumen muy breve del proyecto de automatización y control de manufactura por computadora para la eficiencia operativa, llevado a la práctica por un grupo empresarial de la industria de la fundición de acero. El grupo en cuestión es uno de los corporativos más importantes en Latinoamérica. Las plantas están situadas en las ciudades de Puebla y Monterrey. Posee coinversiones en diferentes partes del

mundo y es propietario de una patente tecnológica mundial en la fundición del acero. El proyecto está considerado como altamente confidencial. La explicación del interés del autor a los directivos de la empresa para contar con material de tesis, pudo permitir el acceso a la documentación y verificación en campo. Sin embargo, no se permitió contar con diagramas o imágenes, indicadores o datos explícitos del proceso con el objeto de conservar la secrecía industrial requerida por el proyecto y la elaboración de nuevos productos..

## **PROYECTOS**

ACC-DA/E1, ACC-DA/E2, ACC-DA/E3

## **METODOLOGÍA**

Estos tres proyectos son producto de un proceso de crecimiento o escalamiento de operaciones automatizadas y enlazadas por computadoras. El interés del grupo industrial está enfocado a incorporar el mayor número de operaciones de manufactura mediante control computarizado. No existe una compañía que venda “llave en mano” el Sistema de Manufactura Integrado por Computadora, por lo que es necesario definir la arquitectura computacional, el tipo de red, la infraestructura de control (PLC, sensores, instrumentación, etc.), los niveles de control así como el tipo de sistema de protocolo, el equipo computacional, el sistema de comunicación, los accesos del personal y el sistema operativo para despliegue de pantallas. Uno de los requisitos más importantes lo constituyen los modelos matemáticos para los algoritmos de control.

## **OBJETIVO**

Los objetivos más importantes del proyecto son la reducción del tiempo de ciclo de manufactura de billets de acero, así como la reducción de costo de la operación de manufactura de los mismos. El incremento de la calidad se espera significativo por la instalación de un espectrómetro láser que permite obtener información en línea de la composición química de las muestras, haciendo más rápida la respuesta para corrección de fórmula.

## **DESARROLLO**

### ETAPA ACC-DA/E1:

En esta etapa se fundamenta la iniciativa de automatización y control por computadora. Se usa una red Ethernet® 540 E conectada a los PLC (Controlador Lógico Programable) de operación en campo mediante el llamado DH+ (Data Highway Plus) con velocidad de procesamiento de 57.6 kbps (kilo bits per second). Los

PLC son del tipo 515/540 marca Allen Bradley. Las conexiones físicas se llevan a cabo con el criterio de la tabla 8.4.1.

**Tabla 8.4.1** Tipos de conexión entre puntos de enlace SMIC

Distancia entre puntos de conexión	Tipo de conexión
Menor de 100 metros	Cable VTP
Mayor de 100 metros	Fibra óptica

El uso de un servidor con software Windows® NT tiene el propósito de permitir la conexión al programa SAP. Las computadoras unitarias utilizadas en las etapas de control previas a la instalación de red fueron del tipo de procesador 80 386 con DOS como software con el propósito de ambientar a la fuerza de trabajo en el uso de teclados y monitores. Actualmente las interfases hombre-máquina son altamente amigables y con facilidad de manejo. La información generada en las líneas de operación, durante una semana, es almacenada en discos especiales (cartridge) llamados cartuchos de memoria. Se debe utilizar este recurso a causa de la cantidad de información registrada (censo, despliegue y grabación). Existen interruptores (switches) en las conexiones nodales para poder aislar conexiones de red-área. La red Ethernet® 540 E es exclusiva para la operación y no está conectada con la red administrativa. La empresa donde se aplica el proyecto, es una de las pocas compañías en el mundo que utiliza protocolo abierto para las operaciones de manufactura. Hasta donde se tiene noticia nos encontramos con un caso muy especial. La inmensa mayoría de las empresas optan por instalar redes privadas y protocolos apropiados, es decir exclusivos de compañía o con interpretadores de lenguaje. Para cada producto existe una ruta de proceso, lo que permite asegurar que el equipo de control automatiza, vía banco de datos, el proceso operativo. La biblioteca de producto, en su memoria principal, contiene los datos, programas y subrutinas que permiten fabricar modelos bajo el dominio de control de cómputo-máquina (automatización) en lugar de control manual (control humano).

#### ETAPA ACC-DA E2-SAP:

Con esta iniciativa, se pretende unir o conectar, vía red de comunicación y computacional, las unidades de control ACC-DA/E1 con las unidades correspondientes de control de ACC-DA/E2-SAP. Con lo anterior, se intenta que la producción siga un programa estructurado, con comandos generados por el programador de producción. Las instrucciones de fabricación con los modelos del producto e información de automatización y

control computacional son llamadas desde la memoria fija del computador central por el programador de producción. Con la información disponible en las pantallas de computadora, el operador verifica las secuencias y procesos previos al inicio de la operación, convirtiéndose en un punto de revisión o supervisión de programa de tarea productiva. Una meta de la segunda etapa es incorporar al programa maestro de control las áreas de ventas, programación de producción, producción y mantenimiento. El control de calidad se realizaba, previo a esta etapa, en forma manual; muestreando el producto con un brazo- crisol y depositando el acero líquido en un recipiente para ser enviado al laboratorio de análisis químicos. Esta logística de muestreo resultó ser muy inapropiada, sobre todo por el tiempo de respuesta para efectuar correcciones en el proceso. Es decir, el proceso de control de calidad no contribuía a las decisiones de tiempo real en el piso de planta. Con el fin de tomar decisiones en tiempo real y programar la base de datos para estándares de operación más precisos, la empresa adquirió una unidad de espectrometría láser para el análisis químico en línea de las muestras de acero fundido. Dicha operación del espectrómetro láser mejoró sustancialmente las decisiones en el proceso. La unidad del espectrómetro láser se conectó a la red mediante un protocolo RS 232.

#### ETAPA ACC-DA/-E2-SAP-MPR II

La siguiente iniciativa, por aplicar, pretende incorporar las funciones de diseño, ingeniería, compras, almacenes y abastecimiento general a la red integrada. Se ha considerado asegurar la operación de manufactura a través de lo que se conoce como infraestructura redundante. La plataforma redundante logra una certeza de operación en el 99.5 % de los casos (5 casos de falla en 1000). Además, la operación continuará dando seguimiento a las instrucciones o rutas de manufactura, aún sin comandos de verificación o de supervisión humana. De allí que la operación redundante requiera de instrumentación, sensores y actuadores muy sofisticados y costosos. Todo cuanto ocurre en el proceso está disponible en las pantallas de computadora. Obviamente existe un nivel de operación de comandos y accesos restringidos para el personal. La inversión a la fecha rebasa los \$10, 000, 000.00 USD y se contempla una inversión parcial en esta tres etapas de \$40, 000, 000.00 USD. La inversión esperada para otras 4 etapas adicionales (SMED, Ingeniería de mantenimiento, Ingeniería de pruebas y CAD-CAM) podría costar cerca de \$80, 000, 000.00 USD. La cifra es verdaderamente elevada pero incluye infraestructura de medición y corrección en tiempo real, la cuál es sobradamente costosa. Una de las desventajas todavía presente a pesar de las cuantiosa inversión, es la

creación de algoritmos y estándares mediante el modelo de ensayo-error-acierto. A la fecha se ha visto reducido el tiempo de ciclo en un 25% y el costo operativo de manufactura en un 15%. El nivel de calidad anterior a esta iniciativa estaba situado en 85% de producto aprobado. Con esta filosofía de manufactura se han estimado los mejores resultados en un valor cercano al 95% de producto aprobado. En consecuencia la productividad se ha incrementado.